

利用浅海的声传播损失反演海面风速^{*}

刘洪宁^{1,2}, 吕连港^{1,2}, 杨光兵^{1,2}, 姜莹^{1,2}, 杨春梅^{1,2}, 刘宗伟^{1,2}

(1. 国家海洋局第一海洋研究所, 山东 青岛 266061;

2. 海洋环境科学和数值模拟国家海洋局重点实验室, 山东 青岛 266061)

摘要: 声信号在浅海环境传播时, 经过海面风浪的不断散射, 传播损失会相应改变。本文通过分析声传播损失计算海面波高, 利用风浪充分成长时波高与风速的关系, 对海面风速进行反演, 并针对声速剖面在有无跃层两种情况下反演过程的异同进行讨论。利用模拟仿真与 2013 年黄海声传播实验数据对其进行了验证, 结果表明此方法是有效的。

关键词: 声学反演; 传播损失; 风速

中图分类号: P733.2

文献标识码: A

文章编号: 1671-6647(2015)02-0164-09

风速变化直接影响到人类生活的各个方面。陆地环境的风场监测一般是利用固定气象站来进行实时记录, 而在海洋中很难建立固定气象站。我国有广阔的海洋国土, 对海洋风场进行长期监测对于研究某区域风场变化规律有十分重要的意义^[1]。

到目前为止, 国内外海面风场的监测方法主要有现场观测、卫星高度计反演^[2]、海洋环境噪声反演^[3]等。现场观测海洋局地风速是十分困难的, 一般借助船只、浮标和石油平台上的风速仪记录风速, 但是受到地域、时间等限制、记录风速数据有限; 卫星高度计反演风速方法主要提供时间、空间上的平均参数; 利用海洋环境噪声反演风速方法开始于 20 世纪 70 年代末, 起初是在外海深水区进行^[4-5], 后来发展到水深较浅的大陆架海域^[3,6], 这种方法采用被动声学测量, 其难点是需要排除噪声干扰。

海面风场是影响海洋特性的重要因素, 其强度变化会直接影响到波浪场。声信号在浅海波导中传播, 经过起伏海面的散射, 其传播损失会有变化^[7]。考虑到风场、波浪、声传播损失之间的关系, 本文提出一种利用声传播损失反演海面风速的方法。该方法基于主动声传播, 可以有效排除噪声干扰。文中利用数值模拟仿真以及 2013 年黄海声传播实验数据进行分析, 验证了该方法的有效性。

1 反演方法

1.1 传播损失与风浪的关系

声信号在浅海波导中传播会不断与海面、海底作用, 海面、海底的不平整性会引起传播能量衰减增强。尤其是当海况较差, 风浪较大时, 海面作用是十分强烈的, 不可简单地假设成镜面。

在浅海中, 简正波为

$$P(r, z) = \frac{i}{4\rho(z_s)} \sum_n u_n(z_s) u_n(z) H_0^1(\gamma_n, r) \quad (1)$$

式中, u_n 为简正波模态函数; r 为传播距离; z_s 为声源深度; z 为接收深度; ρ 为介质密度; γ_n 为介质波数, 亦称

* 收稿日期: 2014-05-29

资助项目: 国家自然科学基金委员会-山东省人民政府联合资助海洋科学研究中心项目——海洋环境动力学和数值模拟(U1406404)

作者简介: 刘洪宁(1989-), 男, 山东青岛人, 硕士研究生, 主要从事声学海洋学方面研究。E-mail: liuhn@fio.org.cn

(李燕 编辑)

为特征值。

浅海中声传播能量损耗包括海面海底的散射与吸收,考虑这些因素,简正波特征值可以表示为 $\gamma_n = k_n + i\alpha_n$,其中 k_n 表示简正波水平波数, α_n 为包含上述各种能量损耗的衰减系数。当频率较低时,可以不考虑海底界面的散射损耗。关于海底、水体引起的吸收衰减参见 Jensen 等^[8]的研究。

Kuperman 和 Ingenito^[9]在 1977 年发表文章中给出的衰减系数计算式为

$$\alpha_n = (4ik_n A_n)^{-1} [\rho_1 (\overline{u_n u_n'} - \overline{u_n'} u_n)_0^H - \rho_2 (\overline{u_n u_n'} - \overline{u_n'} u_n)_H^\infty] \quad (2)$$

其中,

$$A_n = \int_0^\infty dz \rho(z) |u_n|^2$$

式中, ρ_1 为海水密度, ρ_2 为海底密度。

式(2)右边第一项表示 $z=0$ 时海面粗糙度引起的散射损失(d_n^s)表示为

$$\alpha_n^s = (4ik_n A_n)^{-1} \rho_1 |u_n'(0)|^2 \left(\frac{\overline{u_n(0)}}{u_n'(0)} - \frac{u_n(0)}{u_n'(0)} \right) \quad (3)$$

式中, $\overline{u_n} = i \langle a^2 \rangle a(\eta) \partial \overline{u_n} / \partial z$; a 为表征海面粗糙度的物理量,海面的均方根波高为 $\sigma = \langle a^2 \rangle^{1/2}$ 。

1.2 均方根波高与海面风速的关系

波浪与风之间有直接关系,一般情况是风速越大,波高越高。当然波浪的发展不仅取决于风速,也与风时、水深等有关。这个过程是复杂的,相关研究^[10-12]也很多。

在浅海中,若风浪处于充分成长状态,则消去风时等因素,此时决定波高的要素为风速和水深。Ржеплинский 等利用统计处理与因次分析^[13],得到浅海中风速与平均波高的关系为

$$\frac{g\bar{H}}{U^2} = 0.07 \left(\frac{gd}{U^2} \right)^{3/5} \quad (4)$$

式中, g 为重力加速度; \bar{H} 为平均波高; U 是风速; d 是水深。

由式(4),若已知水深与平均波高,则风速为

$$U = \left(\frac{g\bar{H}}{0.07(gd)^{3/5}} \right)^{5/4} \quad (5)$$

而且均方根波高与平均波高差距不大,可以认为二者相等。

由前述可知,通过假设不同的波高对声传播损失进行模拟,根据实验测量的声源级求得模拟声信号强度。利用模拟得到声强级与实际接收信号声强级进行匹配(当模拟的信号强度与实际接收信号强度的标准差最小时得到波高),求出最佳波高,再利用式(5)反演风速。

2 仿真实验及结果分析

本节对浅海声速剖面无跃层以及在有跃层时声源位于跃层上方与下方 3 种情况的风速反演过程进行数值仿真。模拟声速剖面如图 1 所示。由 kraken 模型仿真声传播,假设不同波高,计算获得声压信号。

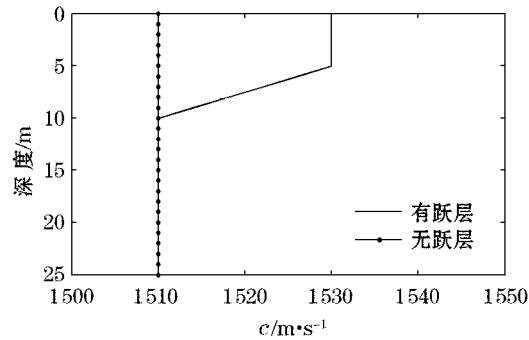


图1 模拟有无跃层两种情况的声速剖面

Fig. 1 Sound speed profiles of simulations with and without thermocline

在声速剖面有跃层、跃层深度为5~10 m时,首先假设声源在跃层之下、深度为15 m,两个接收水听器的深度分别为1和20 m。仿真声源信号为中心频率为460 Hz、带宽100 Hz的M序列,传播距离为10 km,模拟传播损失如图2与图3所示,在深度20 m处,能量较高的低号简正波受到跃层的约束,主要在跃层以下传播,受海面影响小,传播损失对波高的变化不敏感。而在深度1 m处,传播损失受海面波浪影响较大。另外,假设声源位于跃层上方,发射深度为3 m,接收深度、发射信号和传播距离与之前相同,模拟传播损失如图4与图5所示,由于声源位于跃层之上,只能激发高号简正波,且所有激发的简正波都与海面接触,受到海面波浪的影响。

在声速剖面无跃层时,假设发射深度为15 m,接收深度、发射信号和传播距离亦与上面假设相同,各号简正波都与海面接触,传播损失也均受海面波浪影响(图6,图7)。

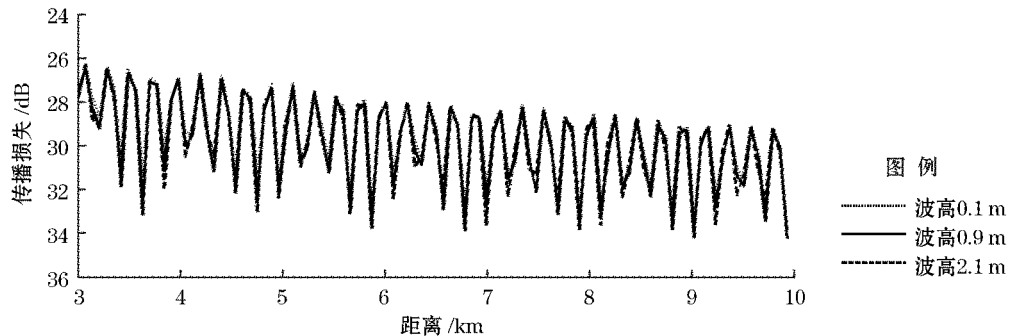


图2 模拟水深20 m处不同波高条件下信号的传播损失(有跃层,声源深度15 m)

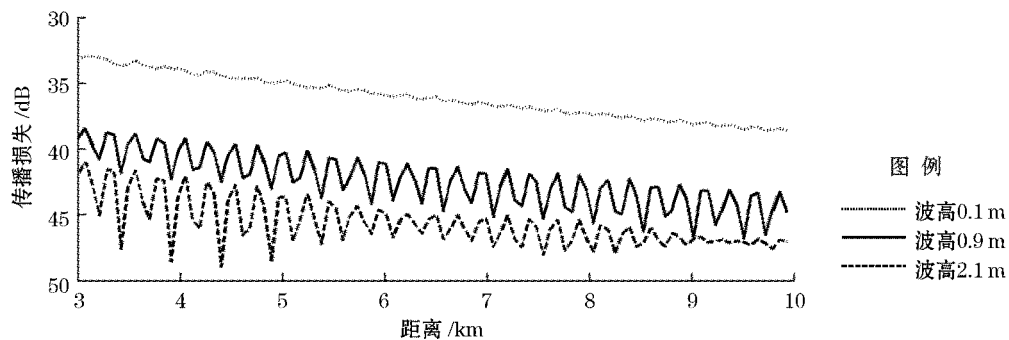
Fig. 2 Transmission loss of signal at 20 m with different wave heights
(with thermocline, depth of sound source is 15 m)

图3 模拟水深1 m处不同波高条件下信号的传播损失(有跃层,声源深度15 m)

Fig. 3 Transmission loss of signal at 1 m with different wave heights
(with thermocline, the depth of sound source is 15 m)

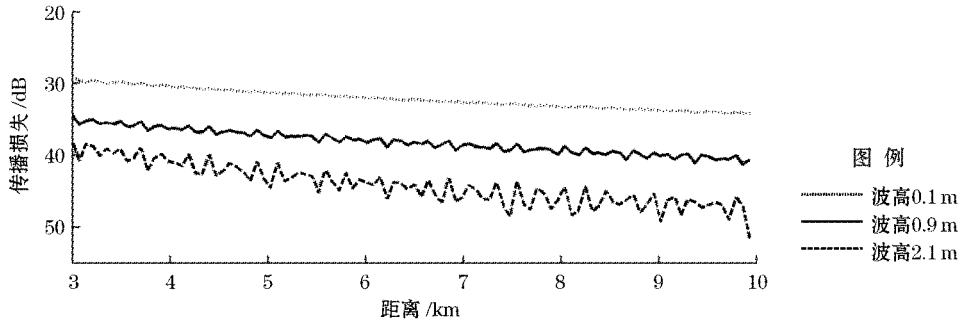


图 4 模拟水深 20 m 处不同波高条件下信号的传播损失(有跃层,声源深度 3 m)
 Fig. 4 Transmission loss of signal at 1 m with different wave heights
 (with thermocline, depth of sound source is 3 m)

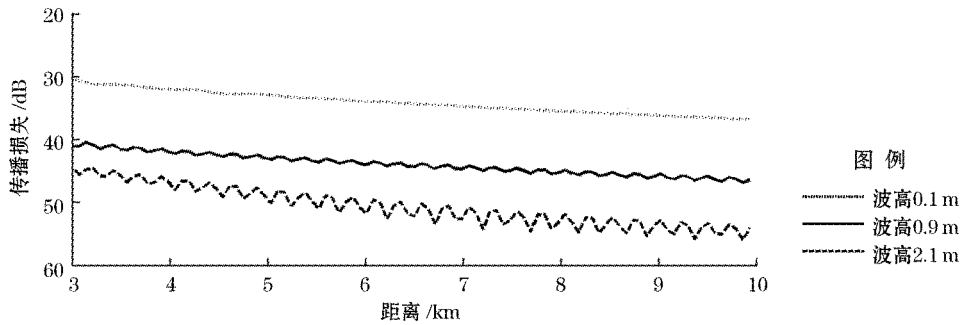


图 5 模拟水深 1 m 处不同波高条件下信号的传播损失(有跃层,声源深度 3 m)
 Fig. 5 Transmission loss of signal at 1 m with different wave heights
 (with thermocline, depth of sound source is 3 m)

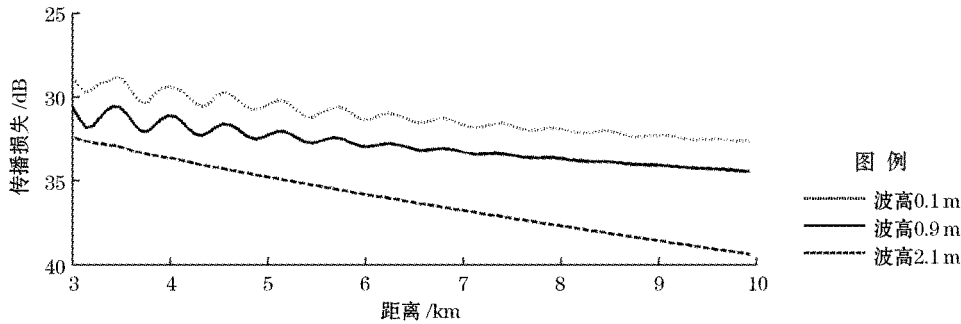


图 6 模拟水深 20 m 处不同波高条件下信号的传播损失(无跃层,声源深度 15 m)
 Fig. 6 Transmission loss of signal at 20 m with different wave heights
 (without thermocline, depth of sound source is 15 m)

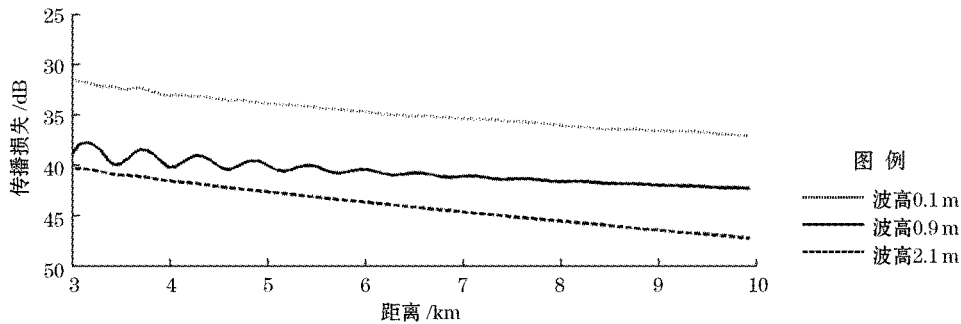


图 7 模拟水深 1 m 处不同波高条件下信号的传播损失(无跃层,声源深度 15 m)
 Fig. 7 Transmission loss of signal at 1 m with different wave heights
 (without thermocline, depth of sound source is 15 m)

假设风速为 8 m/s,由式(5)求出此时波高为 1.1 m,声源信号为含有高斯白噪声的与上文相同的声信号,信噪比 12 dB。在以上两种声速剖面条件下,进行风速反演。反演结果如图 8,图 9 和图 10 所示。

在有跃层的情况,当声源在跃层之下时,跃层以上接收信号的反演结果为 7.59 m/s,与仿真风速仅相差 0.41 m/s;而跃层以下的反演结果为 13.8 m/s,由于不同波高对传播损失影响较小,反演结果存在很大偶然性,本反演方法不适用。当声源在跃层以上时,跃层上方与下方反演结果分别为 7.15 与 7.59 m/s。无跃层的情况,水层上下反演结果都为 7.59 m/s,所以当声源位于跃层上方或者无跃层存在时,利用任何深度接收信号的反演结果都是有效的。而声源位于跃层下方时,仅跃层以上深度接收信号的结果是有效的。

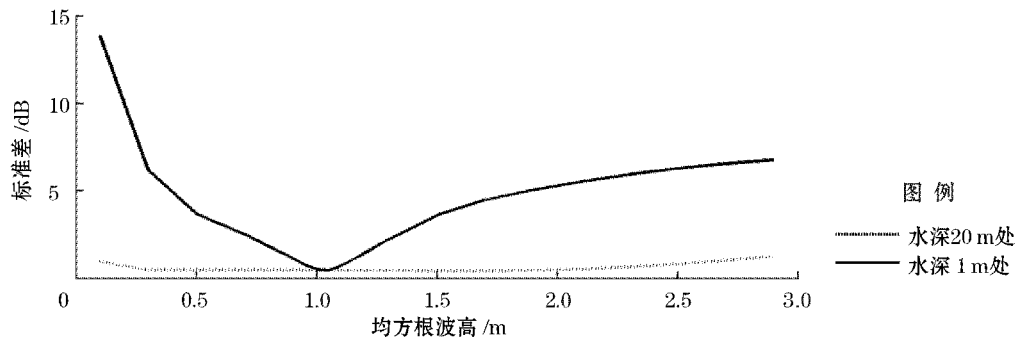


图 8 不同深度情况下接收信号实测与模拟传播损失的标准差(有跃层,声源深度 15 m)

Fig. 8 Standard deviation of sound transmission loss between field measurements and numerical simulations at different depths (with thermocline, depth of sound source is 15 m)

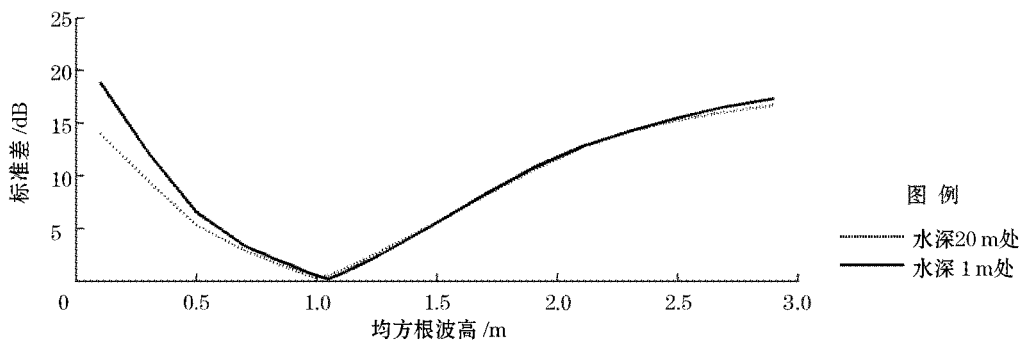


图 9 不同深度情况下接收信号实测与模拟传播损失的标准差(有跃层,声源深度 3 m)

Fig. 9 Standard deviation of sound transmission loss between field measurements and numerical simulations at different depths (with thermocline, depth of sound source is 3 m)

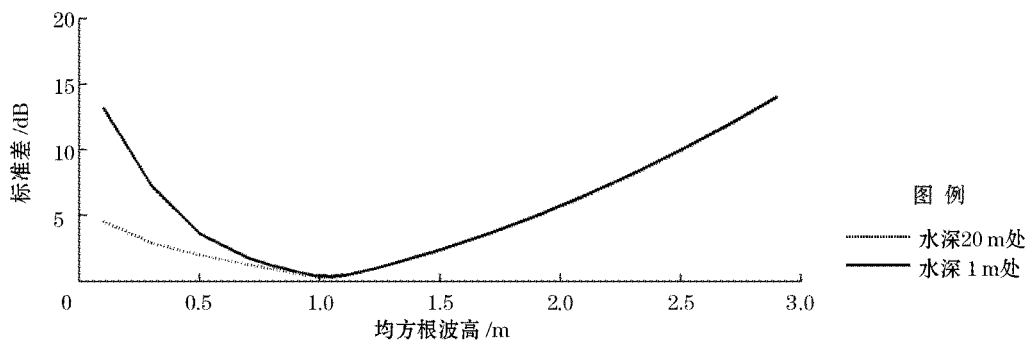


图 10 不同深度情况下接收信号实测与模拟传播损失的标准差(无跃层)

Fig. 10 Standard deviation of sound transmission loss between field measurements and numerical simulations at different depths (without thermocline)

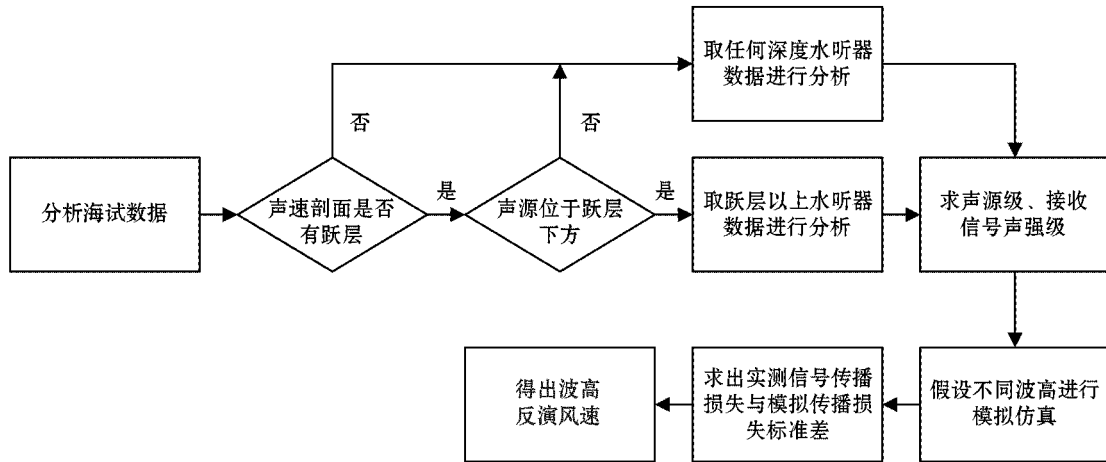


图 11 风速反演流程图

Fig. 11 Flow chart of the wind speed inversion

由以上理论分析与仿真模拟可知,当浅海声速剖面有跃层存在时,若声源位于跃层下方,声传播过程中能量较高的低号筒正波主要在跃层下面传播,根据射线理论,这些在跃层下传播的声信号不与海面作用,不受海面波浪影响,传播损失对波高变化不敏感,反演过程引起的误差比较大;在跃层以上的声信号受海面波浪影响较大,接收信号传播损失对波高的变化敏感,反演误差小。所以此条件下只能用跃层以上的接收信号进行风速反演。当声源位于跃层上方或者无跃层时,各号筒正波都受海面波浪影响,跃层上下接收信号传播损失对波高的变化都较敏感,均可用于反演。针对所有情况的具体反演方法的流程见图 11。

3 实验验证

2013-08 在黄海开展声传播实验,实验前几天海面风速变化不大,可认为风浪得到充分成长。实验海区平均水深 28 m,声速剖面如图 12 所示。海底为粉砂底质^[14],此底质的地声模型^[15]参数如表 1 所示。实验采用发射、接收双船作业,包括 1 个接收站位和 5 个不同距离的发射站位(记为 A, B, C, D, E 站位)。接收船在接收站位抛锚布放 20 元水听器垂直阵,并在船上架设船舶气象仪,实时记录风速、气温、湿度等数据,发射船在各发射站位分别发射中心频率为 460 Hz 与 820 Hz 的 M 序列信号(以下简称 sig1 与 sig2),信号带宽都为 100 Hz,并在每站进行 CTD 测量与声源级测量。

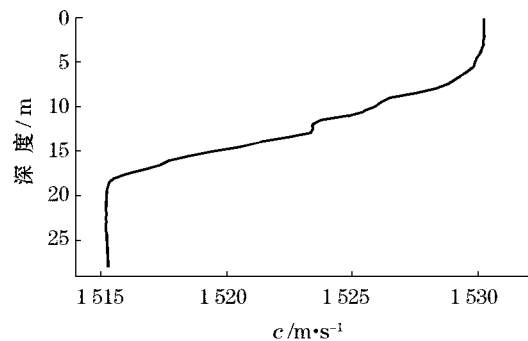


图 12 实验海区声速剖面

Fig. 12 The sound speed profile of the experiment sea area

表 1 实验海区地声模型

Table 1 Parameters of geoacoustic model

海底类型	$C_p/m \cdot s^{-1}$	$C_s/m \cdot s^{-1}$	$\alpha_p/(dB \cdot \lambda_p^{-1})$	$\alpha_s/dB \cdot \lambda_s^{-1}$
粉砂	1575	—	1	1.5

注:“—”处表示无数据

由反演流程图 11 可知,此时应取跃层以上水听器接收信号进行风速反演。首先分析 sig1 信号,文中接收站位深度在 3.5 m 附近的水听器接收信号进行处理,求出声强级,再假设不同的海面粗糙度统计量^[8],利用声传播数值计算模型^[16]模拟各站点声强级(图 13),求出所有站位的模拟声强级与实测声强级标准差之

和,如图 14。波高从低到高变化时,海面散射逐渐增强,造成传播损失增大。海面波高为 0.7 m 时,模拟传播损失与真实测量传播损失最为接近,标准差最小,此时对应的海面粗糙度统计量为海面的均方根波高。利用公式(7),取 g 为 9.8 m/s^2 ,平均水深是 28 m,求得海面风速为 4.57 m/s 。利用同样的方法取跃层以上所有水听器的接收信号分别进行风速反演,各水听器接收信号反演的风速平均值为 5.12 m/s 。再对 sig2 信号进行分析,跃层以上各水听器反演风速平均值为 4.58 m/s 。

为验证反演结果的正确性,对实验过程中风速仪记录数据进行分析(图 15)。实验当天的平均风速是 5.09 m/s 。sig1 与 sig2 反演风速与实际平均风速分别仅相差 0.03 和 0.51 m/s 。而且由布列霍夫斯基^[17]研究可知,在海面不平整性比声波波长小的情况下,这两种频率的声信号传播损失会受到波高 0.7 m 海浪的影响,以上分析证明在浅海环境中利用传播损失来反演海面风速的方法是有效的。由于试验次数限制,不同频率的声信号反演结果的微小差异不代表对风速的反演精度的差异。

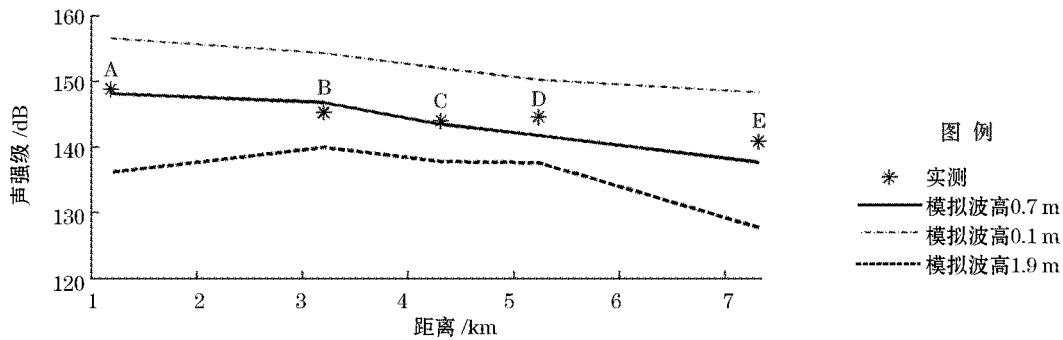


图 13 取不同波高时各站位模拟声强级与实测声强级

Fig. 13 Sound intensity level of field measurement and numerical simulation with different wave heights

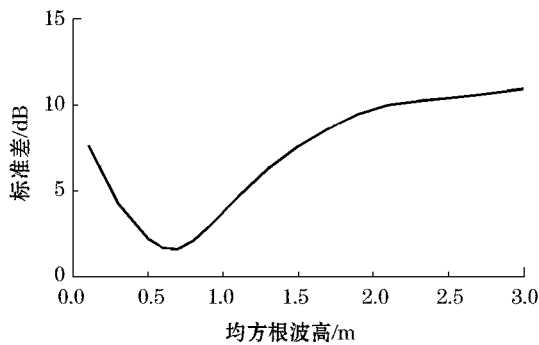


图 14 sig1 模拟声强级与实测值标准差

Fig. 14 Standard deviation of sound intensity level of sig1 between field measurement and numerical simulation

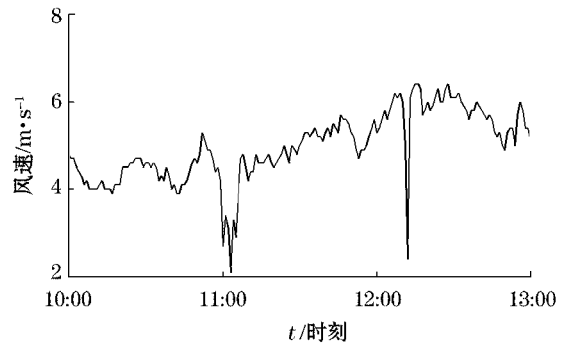


图 15 试验海区实时风速

Fig. 15 Wind speed of the experiment sea area

4 结 论

本文分析了声传播损失、波高和风速三者之间的关系,给出了一种在浅海风浪充分成长的条件下,利用声传播损失反演海面风速的方法。数值仿真研究表明当有跃层时,若声源位于跃层下方,则需取跃层上方的接收信号进行风速反演;当声源位于跃层上方或者无跃层时,各深度接收信号均可用于反演。利用海上声传播实验获取的声传播损失数据反演了实验海区平均风速,反演结果与实测风速数据基本一致。

需要指出的是本文提出的方法是建立在浅海风浪充分成长的条件下;同时波高与声信号应满足 $k\sigma \gg 1$ ^[17],其中 k 为声波波数, σ 为海浪有效波高;存在跃层且声源在跃层之下时,要求用跃层以上的接收信号进行反演;反演的是一定时间内的平均风速,需要更多的实验数据予以验证。此方法采用主动声学测量,相较

于利用海洋噪声反演风速方法更易于排除环境噪声干扰。此方法可利用水听器潜标与声源潜标相配合对海面风速进行长期观测,也可与坐底式声学测波法^[18]相配合,增加采集数据的可靠性。

参考文献(References):

- [1] WANG Q, GAO H W. Study on wind stress and air-sea exchange over coastal waters of Qingdao[J]. *Advances in Marine Science*, 2003, 21(1): 12-20. 王强, 高会旺. 青岛沿海风应力和海气交换研究[J]. *海洋科学进展*, 2003, 21(1): 12-20.
- [2] CHEN G. On retrieving sea surface wind speed from satellite altimeters: Model functions and an application case[J]. *Journal of Remote Sensing*, 1999, 3(4): 305-311. 陈戈. 卫星高度计反演海面风速: 模式函数与应用实例[J]. *遥感学报*, 1999, 3(4): 305-311.
- [3] LIN J H, JIANG G J, YUAN Q L, et al. A modified method evaluating wind speed by ocean ambient noise[J]. *Acta Acustica*, 2006, 31(3): 276-280. 林建恒, 蒋国健, 苑泉乐, 等. 一种海洋环境噪声估计风速的修正法[J]. *声学学报*, 2006, 31(3): 276-280.
- [4] SHAW P T, WATTS D R, ROSSBY H T. On the estimation of oceanic wind speed and stress from ambient noise measurements[J]. *Deep Sea Research*, 1978, 25(12): 1225-1233.
- [5] EVANS D L, WATTS D R, HALPERN D, et al. Oceanic winds measured from the seafloor[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978-2012), 1984, 89(C3): 3457-3461.
- [6] LIN J H, CHANG D Q, MA L, et al. Estimation of surface wind speed by ocean ambient noise[J]. *Acta Acustica*, 2001, 26(3): 217-221. 林建恒, 常道庆, 马力, 等. 海洋环境噪声反演估计海面风速[J]. *声学学报*, 2001, 26(3): 217-221.
- [7] WANG X H, PENG Z H, LI Z L. Effects of wave fluctuation on sound propagation[J]. *Technical Acoustics*, 2007, 26(4): 551-556. 王先华, 彭朝晖, 李整林. 海面波浪起伏对声传播的影响[J]. *声学技术*, 2007, 26(4): 551-556.
- [8] JENSEN F B, KUPERMAN W A, PORTER M B, et al. *Computational ocean acoustics*[M]. New York: Springer, 2011.
- [9] KUPERMAN W A, INGENITO F. Attenuation of the coherent component of sound propagating in shallow water with rough boundaries[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1977, 61(5): 1178-1187.
- [10] WU S P, YIN B S, HOU Y J, et al. Relationship between wave steepness and wave age in the course of wind wave growth[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2004, 22(4): 340-343.
- [11] BOTTEMA M, VAN VLEDDER G P. A ten-year data set for fetch-and depth-limited wave growth[J]. *Coastal Engineering*, 2009, 56(7): 703-725.
- [12] CHEN H X, HUA F, YUAN Y L. Seasonal characteristics and temporal variations of ocean wave in the Chinese offshore waters and adjacent sea areas[J]. *Advances in Marine Science*, 2006, 24(4): 407-415. 陈红霞, 华锋, 袁业立. 中国近海及临近海域海浪的季节特征及其时间变化[J]. *海洋科学进展*, 2006, 24(4): 407-415.
- [13] РЖЕПЛИНСКИЙ Г В. Исследование режима ветрового волнения океанов и расчеты параметров волн[J]. *Труды ГОИН*, 1972, (111): 184.
- [14] EDITORIAL BOARD FOR MARINE ATLAS. *Marine atlas of the Bohai Sea, Yellow Sea and East China Sea (geology and geophysics)* [M]. Beijing: Ocean Press, 1990. 海洋图集编辑委员会. 渤海黄海东海海洋图集: 地质地球物理[M]. 北京: 海洋出版社, 1990.
- [15] HAMILTON E L. Geoacoustic modeling of the sea floor[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1980, 68: 1313.
- [16] PORTER M, REISS E L. A numerical method for ocean-acoustic normal modes[J]. *Journal of the Acoustical Society of America* (S0001-4966), 1984, 76(1): 244-252.
- [17] BREKHOVSKIKH L. *Marine acoustics*[M]. Physics department, Shandong College of Oceanology & Underwater sound laboratory, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences. Beijing: Science Press, 1983. 布列霍夫斯基. 海洋声学[M]. 山东海洋学院物理系, 中国科学院声学研究所水声研究室译. 北京: 科学出版社, 1983.
- [18] ADCP WORKSHOP. Bottom based wave and current meter[J]. *Ocean Technology*, 2001, 20(1): 88-92. ADCP 课题组. 坐底式波流测量仪[J]. *海洋技术*, 2001, 20(1): 88-92.

Sea Surface Wind Speed Inversion Based on Sound Transmission Loss in Shallow Water

LIU Hong-ning^{1,2}, LÜ Lian-gang^{1,2}, YANG Guang-bing^{1,2}, JIANG Ying^{1,2},
YANG Chun-mei^{1,2}, LIU Zong-wei^{1,2}

(1. *The First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266061, China;*

(2. *Key Laboratory of Marine Science and Numerical Modeling, SOA, Qingdao 266061, China*)

Abstract: Surface waves can scatter acoustic signal in the ocean and thus cause a change in sound transmission loss. A new method of inverting wind speed is proposed, in which the wave height is calculated based on sound transmission loss and thus the wind speed is derived through the relationship between the full development of waves and wind speed. The differences in inversion processes with thermocline and without thermocline are also discussed. This method is further verified by numerical simulation and field measurements in the Yellow Sea in 2013 to be effective.

Key words: acoustic inversion; sound transmission loss; wind speed

Received: May 29, 2014