

浅海航道附近水下噪声相干特性异常分析

张纹畅 林建恒 江鹏飞 孙军平 李娜

Analysis of abnormal coherence characteristics of underwater noise near shallow sea channel

ZHANG Wenchang, LIN Jianheng, JIANG Pengfei, SUN Junping, LI Na

在线阅读 View online: <http://www.sxjs.ac.cn/article/doi/10.16300/j.cnki.1000-3630.24031402>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

青岛近海航船相关海洋环境噪声谱级特性分析

Analysis on the spectral level characteristics of ship-associated ocean ambient noise in Qingdao offshore

声学技术. 2022, 41(3): 432-435. <https://doi.org/10.16300/j.cnki.1000-3630.2022.03.018>

一种计算航船对近海海洋环境噪声贡献的算法

An algorithm for calculating the contribution of ship noise to offshore ambient noise

声学技术. 2020, 39(5): 559-566. <https://doi.org/10.16300/j.cnki.1000-3630.2020.05.007>

远离航道海域低频海洋环境噪声垂直指向性

Vertical directionality of low frequency ocean ambient noise in areas far away from the shipping lane

声学技术. 2022, 41(5): 642-647. <https://doi.org/10.16300/j.cnki.1000-3630.2022.05.002>

东中国海夏季海洋环境噪声特性分析

Analysis on the characteristics of ocean ambient noise in the East China Sea in summer

声学技术. 2022, 41(3): 460-464. <https://doi.org/10.16300/j.cnki.1000-3630.2022.03.022>

波浪滑翔器智能海洋环境噪声观测系统

Wave glider intelligent marine ambient noise measurement and observation system

声学技术. 2023, 42(5): 580-587. <https://doi.org/10.16300/j.cnki.1000-3630.2023.05.004>

基于深度学习的舰船辐射噪声多特征融合分类

Multi-feature fusion classification of ship radiated noise based on deep learning

声学技术. 2020, 39(3): 366-371. <https://doi.org/10.16300/j.cnki.1000-3630.2020.03.019>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.24031402 CSTR: 32055.14.sxjs.1000-3630.24031402

引用格式: 张纹畅, 林建恒, 江鹏飞, 等. 浅海航道附近水下噪声相干特性异常分析[J]. 声学技术, 2025, 44(5): 664-670. [ZHANG Wenchang, LIN Jianheng, JIANG Pengfei, et al. Analysis of abnormal coherence characteristics of underwater noise near shallow sea channel[J]. Technical Acoustics, 2025, 44(5): 664-670.]

浅海航道附近水下噪声相干特性异常分析

张纹畅^{1,2}, 林建恒¹, 江鹏飞¹, 孙军平¹, 李娜¹

(1. 中国科学院声学研究所北海研究站, 山东青岛 266114; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 对某近海航道附近的海洋环境噪声数据处理过程中发现, 当双水听器接收阵附近存在过往航船时, 原本在一段时间内几乎不变的噪声相干时频谱中的条纹发生不对称弯折, 且在连续测量的 35 h 内, 相干条纹弯折规律发生了两次改变。为了解释这一试验现象, 文章基于浅海航道附近噪声模型, 对航船经过时的接收噪声时频谱图进行仿真。按照预设接收阵参数的仿真结果并不能解释上述试验现象, 对比温深测量仪所测深度数据和实测噪声相干发生突变的时间, 推测在测量过程中双水听器阵因受两次外力作用而发生了倾斜。在阵倾斜的假设下, 利用浅海航道附近噪声模型, 结合船舶自动识别系统提供的航船实时位置信息, 通过对双水听器阵姿态进行搜索, 实现了对不同时段三艘实测航船噪声相干时频谱图的仿真, 解释了实测噪声相干时频谱条纹的三种弯折规律以及噪声相干出现突变的原因。该研究思路可为解释实测噪声异常现象以及基于噪声相干估计接收阵和波导参数的变化提供技术支持。

关键词: 航船辐射噪声; 海洋环境噪声; 相干条纹; 简正波

中图分类号: O427.5

文献标志码: A

文章编号: 1000-3630(2025)-05-0664-07

Analysis of abnormal coherence characteristics of underwater noise near shallow sea channel

ZHANG Wenchang^{1,2}, LIN Jianheng¹, JIANG Pengfei¹, SUN Junping¹, LI Na¹

(1. Qingdao Branch, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266114, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: During data processing of ocean ambient noise near a ship channel, it was found that the originally almost constant noise coherence stripes exhibited asymmetric bending when ship passes by the hydrophone pair. Within a continuous measurement period of 35 h, the bending pattern of the coherence stripes changed twice. In order to explain this experimental phenomenon, the coherogram when the ship passes by is simulated based on the noise model near the shallow water channel in this paper. However, the simulated noise vertical coherence according to the preset parameters of the hydrophone pair could not explain the experimental phenomenon. By observing the depth data measured by the temperature-depth recorder when the measured coherence abruptly changed, it was speculated that the hydrophone pair tilted during that time. Under the assumption of the tilted array, with real-time ship positions provided by the automatic identification system (AIS), coherogram simulation of the measured noise of three ships at different time period were achieved, explaining the three types of bending phenomena in the measured coherogram and the abrupt changes in noise coherence. The research approach in this paper can provide technical support for explaining abnormal noise phenomena, estimating changes in array and waveguide parameters based on noise coherence.

Key words: ship radiated noise; ocean ambient noise; coherence fringes; normal modes

0 引言

海洋环境噪声场是海洋中普遍存在的固有声场, 它是由海面风浪、航船、海洋生物、人类活动

等产生的声源, 沿着海洋波导传播过程中不断与海面、海底等相互作用形成的。一方面, 海洋环境噪声是水声信号的干扰声场; 另一方面, 噪声在传播过程中不断与海面、海底、海水介质发生作用, 因此噪声场中包含着水下波导的各种环境特性信息和噪声源特性, 可以从中获取有用的海洋环境参数及噪声源信息。噪声垂直相干系数包含着海洋波导的传播特性, 可用来表征海洋环境噪声场的空间分布特性, 在海况变化不大的一段时间内噪声垂直相干系数变化较为平稳^[1-3]。由于噪声垂直相干系数的

收稿日期: 2024-03-14; 修回日期: 2024-03-18

基金项目: 国家自然科学基金(12274433)、基础加强技术领域基金(2022-JCJQ-JJ-0813)、中国科学院声学研究所自主部署“目标导向”类项目(MBDX202102)

作者简介: 张纹畅(1998—), 女, 山东临沂人, 硕士研究生, 研究方向为水下噪声。

通信作者: 林建恒, E-mail: linjh@mail.ioa.ac.cn

获取具有测量方便、经济成本低等优势，不少学者利用其进行地声参数的反演^[4-10]。

在某近海航道附近，利用垂直布放的双水听器阵列采集海洋环境噪声以及附近的航船辐射噪声。对连续采集的 35 h 数据进行噪声垂直相干计算时发现，当测点附近有航船经过时，噪声相干时频谱中条纹发生明显弯折。当测点附近没有航船经过时，噪声相干时频谱中条纹在一段时间内变化平稳，但在两个时刻噪声相干系数发生了突变。针对该试验现象，本文利用浅海航道附近噪声模型对其进行了仿真。通过分析发现，由于测量过程中双水听器阵列的姿态发生了倾斜，导致附近航船航行过程中辐射噪声到两个水听器的水平声程差持续变化，引起噪声相干时频谱条纹发生弯折，且条纹弯折规律与双水听器阵列姿态及航船航向等有关。利用船舶自动识别系统 (automatic identification system, AIS) 提供的航船实时位置信息以及噪声模型，对不同姿态下的双水听器阵列噪声相干进行搜索，仿真给出了实测数据中航船经过时的 3 种不同条纹变化规律的噪声相干时频谱，对试验现象进行了合理解释。

1 浅海航道附近噪声模型

在浅海航道附近，海洋环境噪声的来源主要是海面风关噪声和离散航船辐射噪声。声场的解为二者的非相关叠加^[11-12]。

简正波模型将声场的解表示为一系列本征值和本征函数的加权求和。对于浅海远场，高号简正波的掠射角大，在传播过程中与海底和海面发生多次碰撞，衰减较快。声场可以由号数较少的本征值和本征函数来表示，相对于射线法该方法计算量较小^[13-14]。下面从简正波的角度建立浅海航道附近的噪声模型。

在浅海当航船至接收水听器的距离大于 3 倍水深时，航船辐射噪声可以近似为点声源， (r, z) 处接收声压的简正波表达式为^[1]

$$p(r, z) = \frac{i \cdot S_\omega}{4\rho(z_s)} \sum_{m=1}^M \psi_m(z_s) \psi_m(z) H_0^{(1)}(k_m r) \quad (1)$$

式中： z_s 为声源深度； S_ω 为源强； ρ 为介质密度； k_m 为本征值； ψ_m 为本征函数； $H_0^{(1)}$ 为第一类汉克尔函数。

当声源满足远场近似时，根据第一类汉克尔函数在 $x \rightarrow \infty$ 时的近似关系：

$$H_0^{(1)}(x) \sim \sqrt{\frac{2}{\pi x}} e^{i(x - \pi/2 - \pi/4)} \quad (2)$$

式 (1) 可以近似表示为

$$p(r, z) \approx \frac{i \cdot S_\omega}{\rho(z_s) \sqrt{8\pi r}} e^{-i\frac{\pi}{4}} \sum_m \psi_m(z_s) \psi_m(z) \frac{e^{ik_m r}}{\sqrt{k_m}} \quad (3)$$

假设空间各向同性不相关海面风关噪声源，均匀分布于海面附近深度为 z_w 的无限大平面上，航船辐射噪声源位于 (r_s, z_s) 处，两个接收水听器分别位于 (r_1, z_1) 和 (r_2, z_2) ，如图 1 所示。

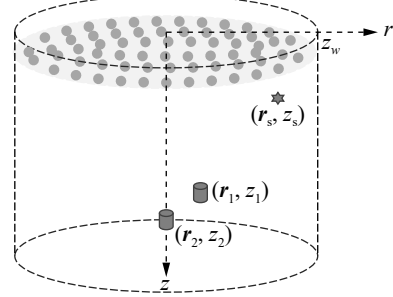


图1 浅海航道附近噪声模型

Fig.1 Noise model near ship channel in shallow sea

根据式 (3)，两个水听器接收的声压分别为

$$p(r_1, z_1) = \frac{i \cdot S_\omega}{\sqrt{8\pi} |r_1 - r_s|} e^{-i\frac{\pi}{4}} \sum_m \psi_m(z_s) \psi_m(z_1) \frac{e^{ik_m |r_1 - r_s|}}{\sqrt{k_m}} \quad (4)$$

$$p(r_2, z_2) = \frac{i \cdot S_\omega}{\sqrt{8\pi} |r_2 - r_s|} e^{-i\frac{\pi}{4}} \sum_m \psi_m(z_s) \psi_m(z_2) \frac{e^{ik_m |r_2 - r_s|}}{\sqrt{k_m}} \quad (5)$$

为了保证声强的收敛性，本征值采用复数形式： $k_m = \kappa_m + i\alpha_m$ ，其中 κ_m 为本征值实部，本征值虚部 α_m 表示模态衰减系数。

仅考虑不相干情况，对于远距离传播的低号简正波，本征值实部远远大于虚部 $\kappa_m \gg \alpha_m$ ，两个水听器接收到的航船辐射噪声源的互谱密度可近似为

$$C_s(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, z_1, z_2) = p(r_1, z_1) p^*(r_2, z_2) \approx \frac{S_\omega^2}{8\pi \sqrt{|r_1 - r_s|} \sqrt{|r_2 - r_s|}} \times \sum_m \psi_m(z_s) \psi_m^*(z_s) \psi_m(z_1) \psi_m^*(z_2) \frac{e^{i\kappa_m d_{\text{diff}}} e^{-\alpha_m d_{\text{sum}}}}{\kappa_m} \quad (6)$$

其中： $d_{\text{diff}} = |r_1 - r_s| - |r_2 - r_s|$ 为航船辐射噪声源距两个水听器的水平距离之差，即水平声程差； $d_{\text{sum}} = |r_1 - r_s| + |r_2 - r_s|$ 为航船辐射噪声源距两个水听器的水平距离之和，即水平声程和。

海面风关噪声源的互谱密度简正波表达式为^[1]

$$C_w(\mathbf{R}, z_1, z_2) = \frac{i\pi q^2}{k^2 \rho^2} \sum_m \sum_n \psi_m(z_w) \psi_m(z_1) \psi_n^*(z_w) \psi_n^*(z_2) \times f_{mn} [H_0^{(1)}(k_m \mathbf{R}) + H_0^{(2)}(k_n \mathbf{R})] \quad (7)$$

其中： $\mathbf{R} = |r_1 - r_2|$ 为两个水听器的水平间距； f_{mn} 为构成噪声场的简正波之间相干性的度量：

$$f_{mm} = \frac{1}{k_{rm}^2 - (k_m^*)^2} \quad (8)$$

对于远场传播简波模式, 有 $\kappa_m \gg \alpha_m$, $\kappa_n \gg \alpha_n$, 则:

$$f_{mm} \approx \frac{1}{4i\alpha_m\kappa_m} \quad (9)$$

利用汉克尔函数与贝塞尔函数的关系 $H_0^{(1)}(x) + H_0^{(2)}(x) = 2J_0(x)$, 海面风关噪声的互谱密度近似为

$$C_w(\mathbf{R}, z_1, z_2) = \frac{\pi q^2}{2k^2 \rho^2} \sum_m \frac{|\psi_m(z_w)|^2 \psi_m(z_1) \psi_m^*(z_2) J_0(\kappa_m \mathbf{R})}{\alpha_m \kappa_m} \quad (10)$$

由相干函数的定义, 海面风关噪声与航船辐射噪声共同形成的噪声场的相干函数为

$$\Gamma = [C_w(\mathbf{R}, z_1, z_2) + A \cdot C_s(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, z_1, z_2)] \cdot [C_w(0, z_1, z_1) + A \cdot C_s(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_1, z_1, z_1)]^{\frac{1}{2}} \cdot [C_w(0, z_2, z_2) + A \cdot C_s(\mathbf{r}_2, \mathbf{r}_2, z_2, z_2)]^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

其中, A 是水听器处航船辐射噪声源强度与海面风关噪声源强度的比值; C_s 是航船辐射噪声的互谱密度。噪声相干系数实部和虚部均能反映噪声场特性, 下文如没有特殊说明, 相干系数均指相干系数实部。

2 浅海航道附近实测噪声相干时频谱分析

课题组于 2022 年 9 月在近海某航道附近海域布放两个相同型号的水听器, 连续采集了 50 h 海洋环境数据。两个水听器分别固定在钢材料三脚架上, 垂直排列, 间距为 0.5 m, 温深测量仪 (temperature-depth recorder, TD) 置于三脚架底部, 记录该位置处的温度、深度和压强。试验设备的简易布放示意图如图 2 所示。试验海域海深约 28 m, 海底没有明显起伏, 在距设备布放位置 1 km 附近存在一条航运繁忙的主航道。

本文选取连续 35 h 的实测数据进行处理。将

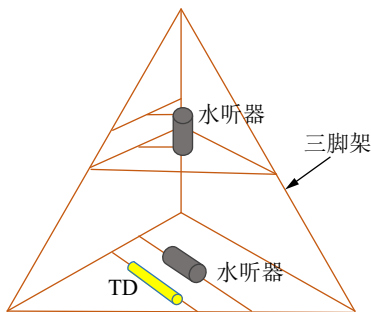


图 2 试验设备布放示意图
Fig.2 Schematic diagram of equipment layout

采集的时域信号 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 分为 N 段, 分别对其进行加窗傅里叶变换, 得到频谱:

$$X_{in}(f) = \text{FFT}[x_{in}(t) \cdot w(t)], i = 1, 2, n = 1, 2, \dots, N \quad (12)$$

将研究频带 (10~5000 Hz) 按 10 Hz 带宽进行平滑得到互谱密度:

$$\hat{S}_{ij}(f_m) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N X_{in}(\Delta f_m) \cdot X_{jn}^*(\Delta f_m) \right) \quad (13)$$

其中: $M = 10/d_f$, d_f 为频率分辨率。相干系数为

$$\hat{\Gamma}_{12}(f_m) = \frac{\hat{S}_{12}}{\sqrt{\hat{S}_{11} \cdot \hat{S}_{22}}} \quad (14)$$

对连续测量的 35 h 噪声相干时频谱进行分析, 结果如图 3 所示。由图 3 可以发现噪声相干系数存在两个“突变”的时刻 (图 3 中箭头所示)。

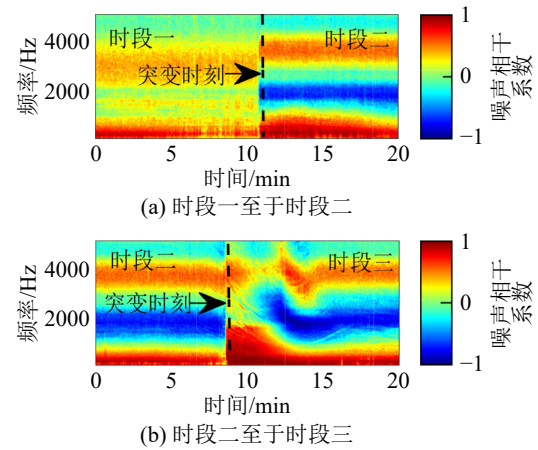


图 3 突变时刻的噪声相干时频谱

Fig.3 The coherogram of the noise at the abrupt change moment

图 3 为连续时间的实测噪声相干时频谱, 在两个“突变”时刻处, 噪声相干系数发生了突变。每个时段的噪声相干系数的零点频率以及振荡幅度均发生了改变。以“突变”时刻为界将研究时段划分为时段一至时段三。对应每个时段, 选择一艘航船经过时噪声相干时频谱条纹变化清晰的数据进行分析, 三艘航船 (分别称为船 A、船 B 和船 C) 经过时的噪声相干时频谱分别如图 4 (a)~4 (c) 所示。

通过对以上实测数据进行分析, 发现: (1) 图 3 中测点附近不存在过往航船时, 各向同性海面风关噪声源和远处航船辐射噪声为海洋环境噪声场的主要成分, 噪声相干系数随时间变化很小。(2) 图 4(a)~4(c) 中测点附近存在过往航船时, 噪声相干时频谱条纹出现明显弯折。在每个时段中, 条纹弯折规律基本相同。但在不同的时段, 航船经过引起的噪声相干时频谱条纹变化规律发生改变。时段一中条纹近似对称变化, 在正横时刻附近噪声相干系数的零

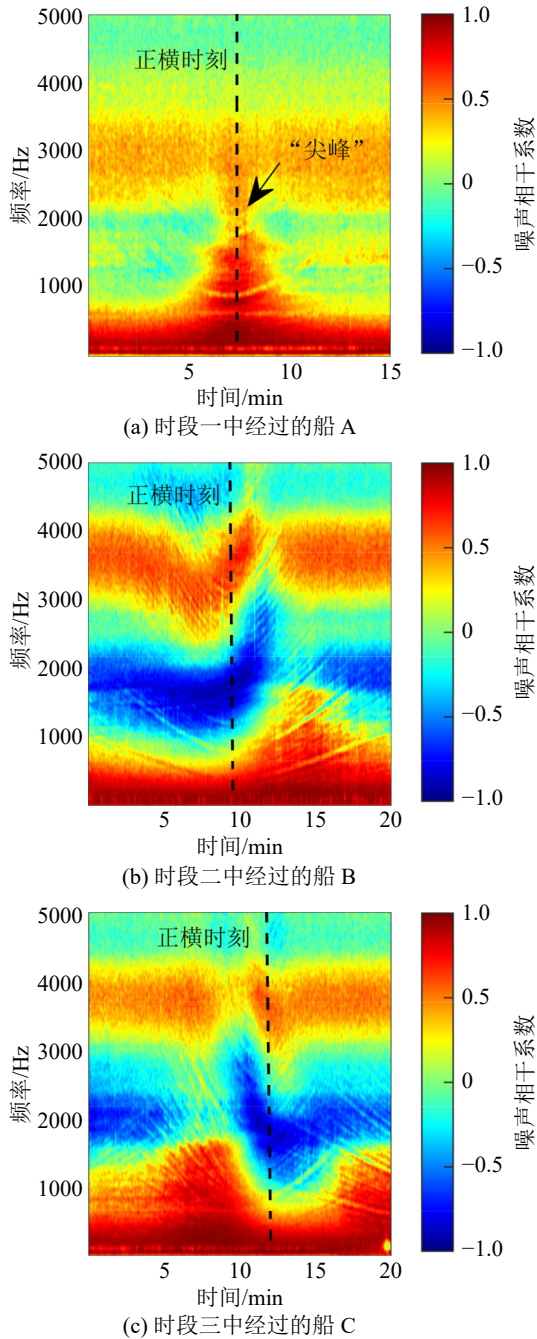


图 4 三个时段不同航船经过时的噪声相干时频谱
Fig.4 Measured coherogram of noise when different ships pass by during three periods

点频率明显增大，呈现“尖峰”状，如图 4(a) 中所示。时段二和时段三中条纹呈现不对称变化，两个时段条纹变化规律相反，且与正横时刻无明显对应关系，分别如图 4(b) 及图 4(c) 所示。

图 5 为该次试验中 TD 测量深度随时间的变化。由图 5 可知，在连续 35 h 的测量时间内，有两个时刻 TD 发生了明显的抖动，这两个时刻与图 3 中噪声相干系数发生突变的时刻完全重合。由此初步推测在这两个时刻测量设备受到了外力作用，在外力作用下双水听器阵列的姿态发生了改变，

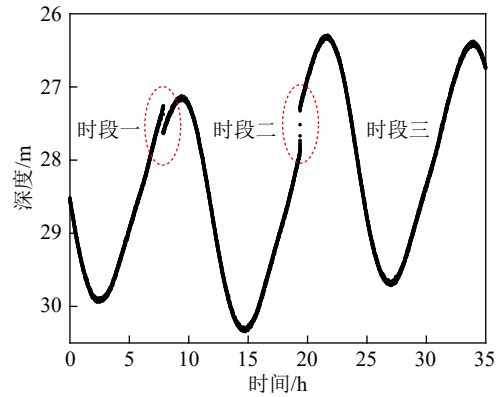


图 5 TD 测量深度随时间的变化
Fig.5 Variation of depth with time measured by TD

导致时频相干条纹发生突变。

3 噪声相干时频谱仿真分析

对第 2 节实测噪声相干时频谱图的变化特性进行仿真分析。采用第 1 节描述的噪声模型，利用 ORCA 简正波计算模型^[15]获取声场的本征值和本征函数。仿真所使用的波导环境如图 6 所示。

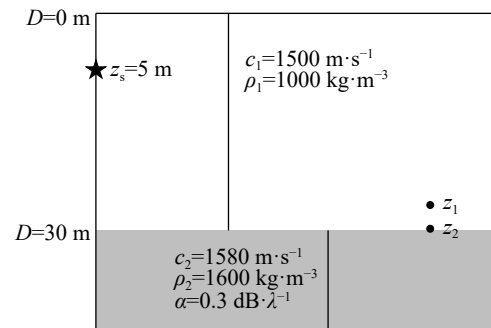


图 6 仿真波导环境示意图
Fig.6 Schematic diagram of waveguide environment simulation

对 AIS 提供的实时航船位置信息进行分析，可以得知在测量过程中多数航船至接收阵的正横位置大于 500 m。假设双水听器阵的真实姿态与预设相同，即垂直布放， $z_1 = 27.5 \text{ m}$ ， $z_2 = 28 \text{ m}$ ；航船的辐射噪声源深度为 5 m，与水听器之间的正横距离为 500 m，航速为 $8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。对 600 s 内航船经过时噪声相干时频谱图进行仿真，如图 7 所示。

由图 7 可知，当双水听器阵列姿态垂直时，在航船靠近接收点的过程中，噪声相干系数在 5000 Hz 频段内均保持较大的值，相干系数的零点频率逐渐减小，在正横时刻时，噪声相干系数的第一个零点频率最小。该场景下，噪声相干时频谱呈现对称变化，由于噪声相干系数的零点频率较大，在整个过程中并未出现明显的条纹变化，且噪声相干时频谱不能解释图 4 条纹明显弯折的试验现象。

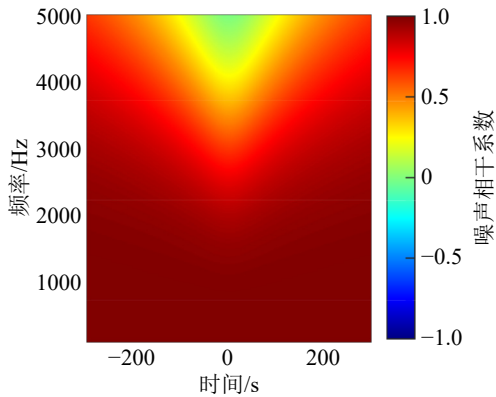


图7 双水听器阵姿态垂直时航船经过时噪声相干时频谱
Fig.7 The ship radiated noise coherogram received by a dual hydrophone array with vertical attitude when a ship passes by

由第2节的分析可知测量过程中TD发生了抖动,双水听器阵的姿态可能发生了倾斜,下面对双水听器阵倾斜情况下的噪声相干时频谱进行分析。

图4时段一中,船A经过时噪声相干时频谱条纹近似对称变化。由式(6)可知,航船辐射噪声相干系数与航船至两个水听器的水平声程差 d_{diff} 有关,噪声相干系数实部受 $\cos(\kappa_m d_{\text{diff}})$ 影响。若航船经过时 d_{diff} 对称变化,则噪声相干时频谱条纹对称变化。满足此假设的双水听器阵姿态仅存在两种可能,一种为双水听器阵连线水平方向投影(下文用水平连线指代)与航线垂直的情况,另一种为双水听器阵水平连线与航线平行的情况。两种情况下的噪声相干时频谱仿真结果分别如图8和图9所示。

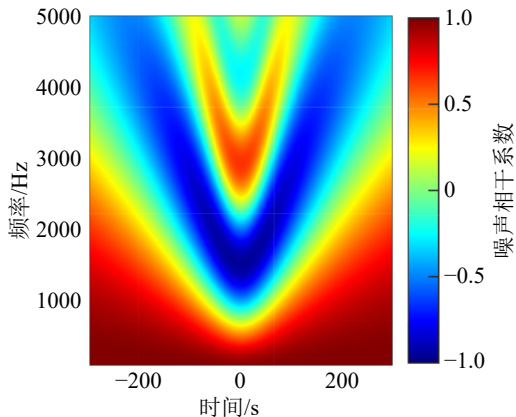


图8 双水听器阵水平连线与航线垂直时航船经过时噪声相干时频谱
Fig.8 The ship radiated noise coherogram when the horizontal connecting line of the dual-hydrophone array is perpendicular to the ship course

由图8和图9可知,这两种双水听器阵姿态下,航船经过时噪声相干时频谱条纹均为对称变化。当双水听器阵水平连线与航线垂直时,条纹与图7变化规律类似,噪声相干系数均在正横时刻处

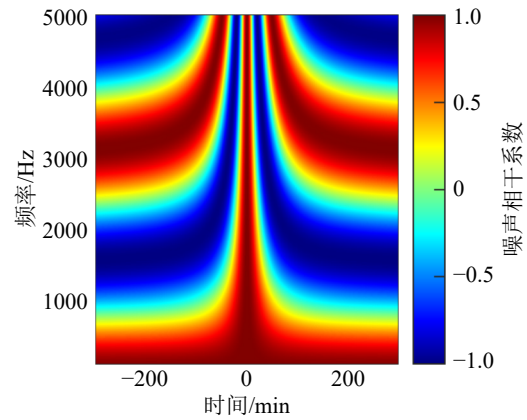


图9 双水听器阵水平连线与航线平行时航船经过时噪声相干时频谱
Fig.9 The ship radiated noise coherogram when the horizontal connecting line of the dual-hydrophone array is parallel to the ship course

零点频率最小,呈现“U”形,但图8中正横时刻附近的噪声相干系数的振荡周期明显缩短,条纹数目增多,在5000 Hz的频段内,相干零点由1个增加至4个。当双水听器阵水平连线与航线平行时,噪声相干时频谱条纹变化规律与图4(a)一致,由此可以确定船A的航线与双水听器阵平行,且由于测量时段内多数航船均沿同一条航道航行,航向相似,故时段一中双水听器阵水平连线与航道近似平行。当航船位于正横位置时,其到两个水听器水平声程差 d_{diff} 为0, $\cos(\kappa_m d_{\text{diff}})$ 取得最大值1,由式(6)可知,此时噪声相干系数达到最大。随着航船远离正横位置, d_{diff} 逐渐增大,噪声相干系数减小,故正横位置附近噪声时频谱图呈现“尖峰”状。由于 d_{diff} 在正横时刻前后对称变化,噪声相干时频谱条纹对称变化。

对于时段二和时段三噪声相干时频谱条纹变化不对称的现象,根据上述分析,推测是由于双水听器阵水平连线与航线相交所致。以双水听器阵水平连线与航线之间的夹角为 45° 进行噪声相干时频谱仿真,结果如图10所示。

由图10可知,当双水听器阵水平连线与航线相交时,噪声相干时频谱条纹呈现不对称变化。该仿真结果与图4(c)中船C经过时的条纹变化规律一致,由此可以确定时段三双水听器阵水平连线与航道相交。船B经过时噪声相干时频谱条纹规律与船C相反,根据AIS提供的船B及船C的实时位置信息可知,两艘航船的航向相近,因此条纹变化规律相反并非由航向引起,而是由水听器阵水平连线与航道的夹角大于 90° 所致。

利用第1节浅海航道附近噪声模型,结合AIS提供的航船位置信息,对不同双水听器阵姿态

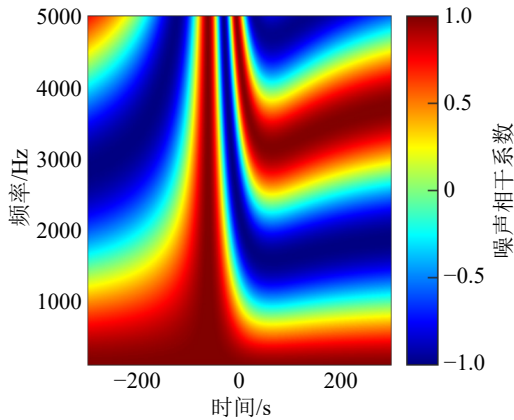
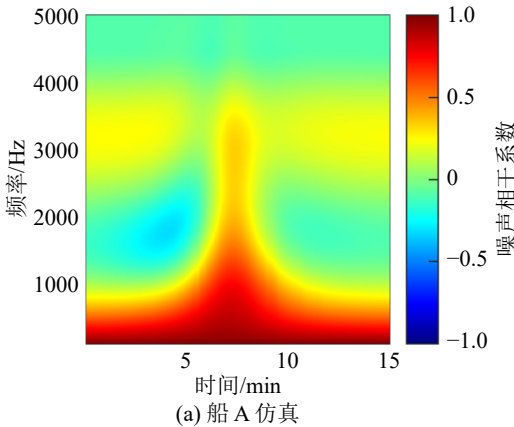


图 10 双水听器阵水平连线与航线存在 45° 夹角时的噪声相干时频谱

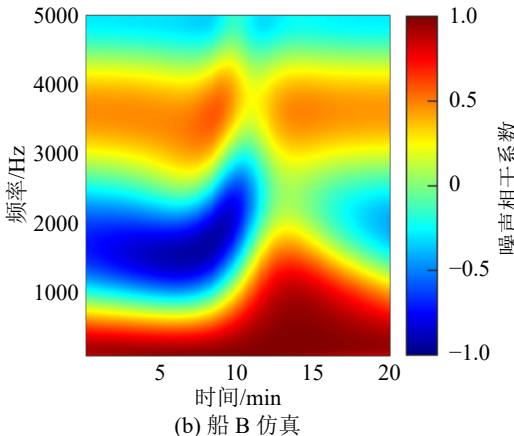
Fig.10 The ship radiated noise coherogram when the horizontal connecting line of the dual-hydrophone array forms a 45° angle with the ship course

进行搜索，得到拟合情况最优的噪声相干时频谱，三个时段中双水听器水平连线与航道的夹角分别为 10° 、 127° 以及 40° 。对船 A、船 B 和船 C 经过时的噪声相干时频谱进行仿真，结果分别如图 11(a)~11(c) 所示。

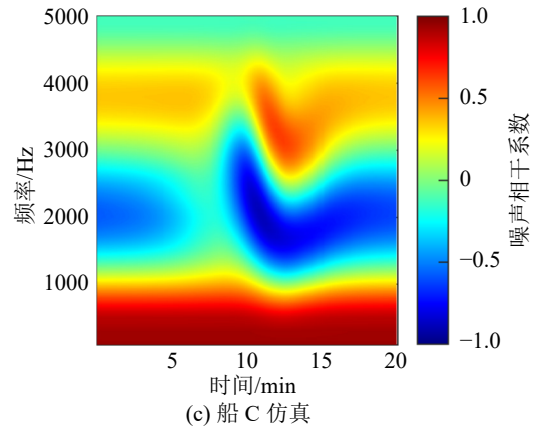
从图 11 (a)~11(c) 对三艘不同航船的仿真结果可以看到，其分别与图 4 (a)~(c) 对应航船的实测噪声相干时频谱较为一致。从而验证了双水听器阵姿态倾斜导致实测数据噪声相干时频条纹变化的推



(a) 船 A 仿真



(b) 船 B 仿真



(c) 船 C 仿真

图 11 不同航船经过时噪声相干时频谱仿真

Fig.11 Simulation of noise coherogram when different ships pass by

测，较好地解释了试验现象。

4 结论

本文在对某近海航道附近采集的连续 35 h 海洋环境数据的处理过程中发现，当航船经过时原本在一段时间内几乎不变的噪声相干时频谱条纹发生明显不对称弯折，且在连续采集的 35 h 内，噪声时频相干条纹发生了两次突变。

为了解释上述时频相干条纹的异常弯折现象，本文基于简正波理论建立了浅海航道附近的噪声模型，对不同姿态下双水听器阵接收噪声时频谱图进行了仿真。通过对仿真结果进行分析，发现当接收点附近有航船经过时，时频相干条纹与阵姿态有关。当阵按照预设垂直布放时，航船经过时的噪声相干时频谱对称变化，呈现“U”形，且变化不明显，与试验现象不符。当阵水平连线与航线垂直时，时频相干条纹同样呈“U”形对称变化，但在正横时刻附近时频相干条纹数目增多。当阵水平连线与航线平行时，时频相干条纹呈现对称变化，在正横时刻附近出现“尖峰”，解释了时段一中实测噪声相干时频谱条纹近似对称变化的特性。当阵水平连线与航线相交时，时频相干条纹不对称变化，不对称程度与阵水平连线和航线之间的夹角有关，解释了时段二和时段三中实测噪声相干时频谱的条纹不对称变化特性。

结合第 1 节噪声模型以及 AIS 提供的航船实时位置信息，对不同姿态下双水听器接收噪声相干时频谱进行搜索，仿真了不同时段中三艘航船经过时的噪声相干时频谱，仿真结果与实测噪声相干时频谱较为一致。搜索结果显示，双水听器阵在 35 h 内存在三种姿态，其中，时段一中水听器阵水平连

线与航道近似平行, 时段二中水听器阵水平连线与航道之间的夹角小于 90° , 时段三中水听器阵水平连线与航道之间的夹角大于 90° 。结合 TD 所测深度数据在整个过程中出现的两次抖动, 解释了实测噪声相干系数出现两次突变的现象。本文的研究思路不仅可解释实测噪声的异常现象, 也可为基于海洋环境噪声相干估计接收阵或波导相关参数变化提供技术支持。

参 考 文 献

- [1] JENSEN F B, KUPERMAN W A, PORTER M B, et al. Computational ocean acoustics[M]. 2nd ed. New York: Springer, 2011.
- [2] BARCLAY D R, BUCKINGHAM M J. On the spatial properties of ambient noise in the Tonga Trench, including effects of bathymetric shadowing[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2014, **136**(5): 2497-2511.
- [3] BARCLAY D R, BUCKINGHAM M J. Depth dependence of wind-driven, broadband ambient noise in the Philippine Sea[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2013, **133**(1): 62-71.
- [4] LI Z, ZHANG R, YAN J, et al. Geoacoustic inversion by matched-field processing combined with vertical reflection coefficients and vertical correlation[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2004, **29**(4): 973-979.
- [5] HARRISON C H, SIMONS D G. Geoacoustic inversion of ambient noise: a simple method[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2002, **112**(4): 1377-1389.
- [6] 江鹏飞, 林建恒, 马力, 等. 一种海洋环境噪声分步反演地声参数方法[J]. *声学学报*, 2016, **41**(1): 59-66.
JIANG Pengfei, LIN Jianheng, MA Li, et al. A multi-step method of geo-acoustic inversion by ambient noise[J]. *Acta Acustica*, 2016, **41**(1): 59-66.
- [7] 吴国灏. 基于海洋环境噪声的地声参数反演研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2020.
WU Guoli. Research on geoacoustic inversion using marine ambient noise[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2020.
- [8] MUZI L, SIDERIUS M, NIELSEN P L. Frequency based noise coherence-function extension and application to passive bottom-loss estimation[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2016, **140**(3): 1513-1524.
- [9] 陈勃, 赵梅, 胡长青, 等. 射线理论下的浅海环境噪声场空间相干性分析及海底声学参数反演[J]. *声学学报*, 2018, **43**(3): 298-306.
CHEN Bo, ZHAO Mei, HU Changqing, et al. Analysis on spatial coherence of ambient noise and geoacoustic inversion in shallow water[J]. *Acta Acustica*, 2018, **43**(3): 298-306.
- [10] 江鹏飞, 林建恒, 孙军平, 等. 利用海洋环境噪声直接提取海底反射系数[J]. *声学学报*, 2022, **47**(1): 53-60.
JIANG Pengfei, LIN Jianheng, SUN Junping, et al. Directly extracting seabed reflection coefficient using ocean ambient noise[J]. *Acta Acustica*, 2022, **47**(1): 53-60.
- [11] 何利, 李整林, 彭朝晖. 航道附近的海洋环境噪声场模型[J]. *中国科学 (G 辑: 物理学 力学 天文学)*, 2009, **39**(2): 249-254.
HE Li, LI Zhenglin, PENG (ChaoZhao)(Hui). Marine environmental noise field model near waterway[J]. *Science in China (Series G (Physics, Mechanics & Astronomy))*, 2009, **39**(2): 249-254.
- [12] SHAJAHAN N, BARCLAY D R, LIN Y T. Quantifying the contribution of ship noise to the underwater sound field[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2020, **148**(6): 3863.
- [13] 汪德昭, 尚尔昌. 水声学[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2013.
- [14] 刘伯胜, 雷家煜. 水声学原理[M]. 2 版. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2010.
- [15] WALES S C, HEITMEYER R M. An ensemble source spectra model for merchant ship-radiated noise[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2002, **111**(3): 1211-1231.