

引用格式: 何琪, 宫在晓, 李整林, 等. 基于时延冗余测量的阵形校准[J]. 声学技术, 2022, 41(3): 301-305. [HE Qi, GONG Zaixiao, LI Zhenglin, et al. Time delay redundancy measurement for array shape calibration[J]. Technical Acoustics, 2022, 41(3): 301-305.] DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2022.03.001

基于时延冗余测量的阵形校准

何 琪^{1,2}, 宫在晓¹, 李整林³, 李风华¹, 郭良浩¹

(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. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中山大学海洋工程与技术学院, 广东珠海 519000)

摘要: 海底柔性水平阵的阵形校准, 可以利用两个校准声源测量阵元间的声传播时延差来求解得到。传统算法只利用了相邻阵元信号测量的时延差, 但误差会随噪声增大而出现累积。在信噪比降低时, 所提方法通过冗余时延测量有效地减少了误差累积, 从而提高了阵形校准的精度与稳定性。数值仿真与实验结果都验证了该方法的有效性。

关键词: 阵形校准; 时延估计

中图分类号: TN911.7

文献标志码: A

文章编号: 1000-3630(2022)-03-0301-05

Time delay redundancy measurement for array shape calibration

HE Qi^{1,2}, GONG Zaixiao¹, LI Zhenglin³, LI Fenghua¹, GUO Lianghao¹

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

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. School of Ocean Engineering and Technology, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519000, Guangdong, China)

Abstract: The array shape calibration of a flexible horizontal array deployed on the sea-bottom can be solved by measuring the sound propagation delay difference between the array elements with two auxiliary sources. The traditional algorithms only measure the time delay difference between adjacent array elements, and the error will accumulate with the increase of noise. However, the proposed method in this paper can effectively reduce the accumulation of errors through redundant time delay measurement when the signal to noise ratio decreases, therefore the accuracy and stability of array-shape calibration can be improved. Numerical simulation and experiment results both verify the effectiveness of the method.

Key words: array shape calibration; time delay estimation

0 引 言

阵形校准精度对目标测向性能有着显著影响^[1]。布放于海底的柔性水平阵, 由于受到布放、内波、浪涌等因素的影响, 实际阵形往往与预设阵形有较大差异。进行阵列形状校准工作, 可以提高后续信号处理算法的探测性能, 尤其是各种自适应算法的性能。

已有的阵形校准方法大致分为两类: 一类为无源校准^[2-3], 无需额外的校准声源, 利用噪声源就可以实现, 但是反演得到的是阵列形状, 只知道两两阵元之间的距离, 需要额外信息对初步结果进行平移、旋转、翻转等操作才能获取各阵元的准确位置; 另一类为有源校准^[4], 通过利用校准声源, 结合声

源与参考阵元的位置信息, 测量各相邻阵元间接收信号的时间延迟, 从而获得各阵元相对参考阵元的准确位置; 但由于浅海信道存在纵向相关振荡现象^[5], 以及受到海洋环境噪声等因素影响, 传统方法^[4]会因为时延估计误差累积造成校准阵形的偏差。

本文提出基于时延冗余测量的阵形校准方法, 通过估计全部两两组合的阵元间的信号时延, 充分利用数据, 可以有效提高校准精度, 并通过数值仿真与实验对方法进行了验证。

1 理论分析

1.1 信号模型

根据简正波理论^[6], 在水平不变分层的海洋波导环境中, 点声源激发的单频声场可以表示为 M 阶简正波的线性叠加

$$p(f, r, z) \approx \frac{j e^{-j\pi/4}}{\rho(z_s) \sqrt{8\pi r}} \sum_{m=1}^M \Psi_m(z_s) \Psi_m(z) \frac{e^{jk_{rm}r}}{\sqrt{k_{rm}}} \quad (1)$$

其中: k_{rm} 为第 m 阶模态的水平波数, Ψ_m 为第 m 阶

收稿日期: 2022-02-08; 修回日期: 2022-04-26

基金项目: 国家自然科学基金(11874061、12174418)资助项目

作者简介: 何琪(1994—), 女, 甘肃兰州人, 博士研究生, 研究方向为水声信号处理。

通信作者: 郭良浩, glh2002@mail.ioa.ac.cn

模态的深度函数, $\rho(z_s)$ 为声源处水介质的密度, z_s 和 z 分别为声源深度和接收深度, r 为阵元与声源间的水平距离。

假定在频带 $[f_L, f_H]$ 内, 声源信号的频谱为 $S(f)$, 则第 i 号阵元接收该频段信号的时域波形为

$$s_i(t) = \int_{f_L}^{f_H} S(f) p(f, r_i, z) e^{-j2\pi f t} df, \quad i=1, \dots, I \quad (2)$$

其中: r_i 为第 i 号阵元与声源间的水平距离。

1.2 阵形校准方法

校准方法示意图如图 1 所示, S_1 、 S_2 分别为校准声源的位置, O 为海底水平阵参考阵元的位置, A_i 为某待校准阵元的位置。

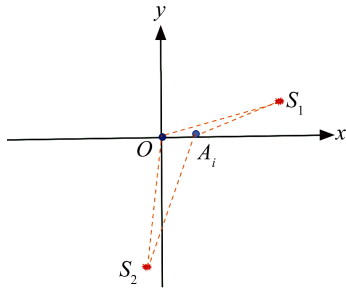


图 1 校准方法示意图

Fig.1 Schematic diagram of calibration method

已知声源 $S_1(X_1, Y_1)$ 、 $S_2(X_2, Y_2)$ 与参考阵元 $O(x_1, y_1)$ 的 GPS 位置信息, 通过估计各阵元较参考阵元的信号到达时延, 以求解 A_i 点坐标 (x_i, y_i) :

$$\sqrt{(X_k - x_i)^2 + (Y_k - y_i)^2} - \sqrt{(X_k - x_1)^2 + (Y_k - y_1)^2} = c_0 \cdot \Delta t_i^k, \quad k=1, 2; i=2, \dots, I \quad (3)$$

其中: Δt_i^k 为第 i 个阵元较参考阵元的信号到达时延, c_0 为阵形校准的参考声速。

选取目标函数如下:

$$J(x_i, y_i) = \left| \sqrt{(X_1 - x_i)^2 + (Y_1 - y_i)^2} - \sqrt{(X_1 - x_1)^2 + (Y_1 - y_1)^2} - c_0 \cdot \Delta t_i^1 \right| + \left| \sqrt{(X_2 - x_i)^2 + (Y_2 - y_i)^2} - \sqrt{(X_2 - x_1)^2 + (Y_2 - y_1)^2} - c_0 \cdot \Delta t_i^2 \right| \quad (4)$$

通过优化搜索, 可得 A_i 点坐标:

$$(\hat{x}_i, \hat{y}_i) = \arg \min_{x_i, y_i} J(x_i, y_i) \quad (5)$$

由于浅海信道存在纵向相关振荡现象^[5], 同时受海洋环境噪声等因素影响, 简单地以参考阵元为基准估计时延存在误差。

1.3 时延估计

任意两个阵元间的信号时延可以根据相关峰的位置来估计:

$$\hat{\delta}_{wu}^k = \arg \max_{\delta} \left\{ \int_{f_L}^{f_H} p_w^k(f) p_u^{k*}(f) e^{-j2\pi f \delta} df \right\}, \quad w=1, \dots, I; u=1, \dots, I; k=1, 2, \quad (6)$$

其中: 上标 * 表示取共轭, 最大相关系数对应的 δ 即为阵元 A_u 相对于阵元 A_w 接收到声源 S_k 的信号时延估计值。

测量全部阵元组合后, 可得两两阵元间的时延估计矩阵 $\mathbf{G}^k$:

$$\mathbf{G}^k = \begin{bmatrix} \hat{\delta}_{11}^k & \dots & \hat{\delta}_{1I}^k \\ \vdots & \hat{\delta}_{ii}^k & \vdots \\ \hat{\delta}_{I1}^k & \dots & \hat{\delta}_{II}^k \end{bmatrix}, \quad j=1, \dots, I; i=1, \dots, I; k=1, 2 \quad (7)$$

其中: $\hat{\delta}_{ii}^k = 0, \hat{\delta}_{ji}^k = -\hat{\delta}_{ij}^k$, $\mathbf{G}^k$ 需要估计的阵元间时延变量总数为 $\frac{I(I-1)}{2}$

1.3.1 时延累计测量

在高信噪比和信号空间相关较好的理想条件下, 文献[4]近似为通过两两相邻阵元的信号相关来估计时延, 累计可得第 i 个阵元相对参考阵元的时延量为

$$\Delta t_i^k = \sum_{j=1}^{i-1} \hat{\delta}_{jg}^k, g=j+1, k=1, 2 \quad (8)$$

进而估计阵形参数。

1.3.2 时延冗余测量

当信噪比偏低、或者声场相关存在起伏的情况下, 仅仅测量 $(I-1)$ 个相邻阵元的时延并没有充分利用信号的空间信息。通过全部两两阵元组合进行 $\frac{I(I-1)}{2}$ 次时延估计, 然后由最小二乘方法计算第 i 个阵元相对参考阵元的时延量, 可更好地对时延进行估计:

$$\mathbf{P} = \mathbf{A}^T \mathbf{B} \quad (9)$$

其中:

$$\mathbf{P} = [\Delta t_2^k \quad \dots \quad \Delta t_i^k \quad \dots \quad \Delta t_I^k]^T, \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & 0 \\ & & \dots & & & & & \\ 0 & \dots & \dots & -1 & \dots & 1 & \dots & 0 \\ & & \dots & & \dots & & & \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & -1 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B} = [\hat{\delta}_{12}^k \quad \hat{\delta}_{13}^k \quad \dots \quad \hat{\delta}_{ji}^k \quad \dots \quad \hat{\delta}_{(I-2)(I-1)}^k \quad \hat{\delta}_{(I-2)I}^k \quad \hat{\delta}_{(I-1)I}^k]^T。$$

$\mathbf{A}$ 为 Δt_i^k 与 $\hat{\delta}_{ji}^k$ 之间的对应关系, 前 $(I-1)$ 行元素中, 仅有主对角线元素为 1, 其余部分元素为 0, 第 I 行到 $\frac{(I-1)(I-2)}{2}$ 行元素, 对应的第 $(j-1)$ 列元

素为-1, 对应的第 $(i-1)$ 列元素为 1, 其余部分元素为 0。

$$\text{以 } I=3 \text{ 为例, 此时 } A = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}。$$

1.4 阵形校准误差

定义阵形校准误差为

$$\overline{\Delta r} = \sqrt{\frac{1}{I} \sum_{i=1}^I [(\hat{x}_i - x_{0i})^2 + (\hat{y}_i - y_{0i})^2]}, \quad i=1, \dots, I \quad (10)$$

其中: $(\hat{x}_i, \hat{y}_i)$ 为校准得到的阵元位置坐标, (x_{0i}, y_{0i}) 为阵元位置坐标的真值。

2 数值仿真

2.1 波导环境参数

通过数值仿真来对比上述两种时延估计方法用于阵形校准的差异。根据实验中测量的数据来设置声场仿真所用的信道参数, 接收阵位置处实测声速剖面如图 2 所示, 水层介质密度设为 $1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 海深设为 96 m, 海水的声吸收衰减系数设为 $0 \text{ dB} \cdot \lambda^{-1}$ 。海底假设为平坦半无限基底, 声速 $1630 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 密度为 $1.76 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 衰减系数 $0.33 \text{ dB} \cdot \lambda^{-1}$ 。参考声速选取为 $1568 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 声源深度设为 50 m, 接收阵列布放于海底。仿真信号频段选为 20~30 Hz, 分辨率为 0.2 Hz, 采样率设置为 16 000 Hz, 使用 Kraken 程序^[7]计算声场。

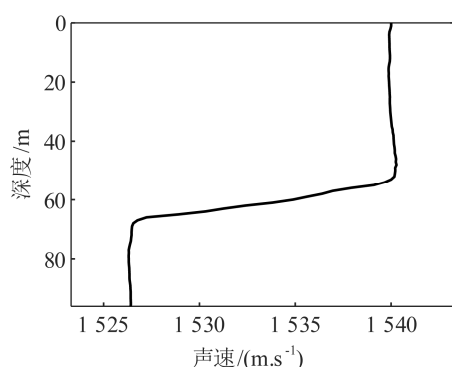


图2 实测的声速剖面
Fig.2 A measured sound velocity profile

2.2 阵形校准

根据文献[4]校准声源的最佳位置关系, 布设校准声源位置如下: 以 x 轴正半轴为 0° 方向, 逆时针方向旋转角度递增, S_1 在参考阵元 O 的 0° 方向, 距离为 20 km; S_2 在参考阵元 O 的 270° 方向, 距离为 20 km。

信噪比为 10 dB 时阵形校准结果如图 3 所示, 校准阵列是阵元间距 10 m 的 11 元直线阵。

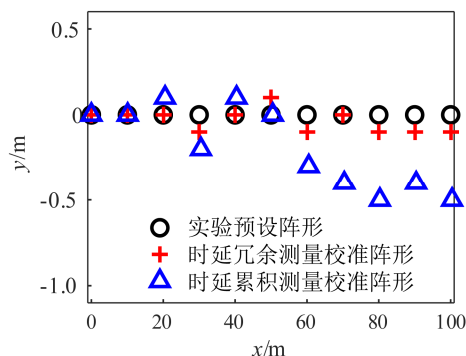


图3 信噪比为 10 dB 时两种方法的阵形校准结果
Fig.3 Array shape calibration results of the two methods when the SNR is 10 dB

由图 3 中的对比可以看出, 基于时延冗余测量的阵形校准结果明显优于基于时延累积测量的校准结果。进一步考察不同信噪比下, 两种时延估计方法的阵形校准精度。给接收信号添加不同大小的高斯白噪声, 并进行 100 次蒙特卡洛仿真实验。图 4 给出了信噪比在 5~30 dB 范围内变化时, 两种方法阵形校准误差的均值与标准差。

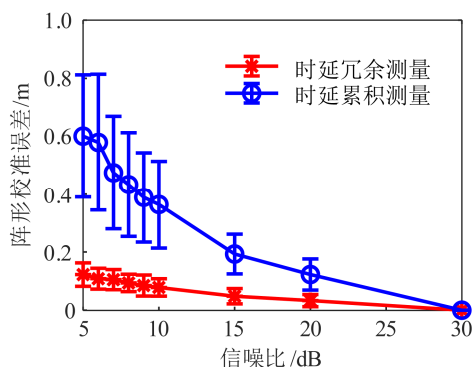


图4 不同信噪比下两种方法的阵形校准误差的均值与标准差
Fig.4 Means and standard deviations of the array shape calibration errors of the two methods under different signal to noise ratios

从图 4 可以看出, 在信噪比大于 30 dB 时, 时延冗余测量方法和时延累积测量方法都可以准确地实现阵形校准, 而信噪比降低时, 时延冗余测量的优势更为明显, 不仅误差均值小, 而且标准差也更小。如以误差校准精度 0.1 m 为门限, 冗余测量方法对信号的信噪比要求比累积测量方法低约 10 dB。

3 实验数据处理

3.1 实验描述

2020 年 9 月某近海实验中, 8 元水平接收阵布

放于海底,阵列的信号采样率为 16 kHz,灵敏度为 -170 dB,实验船沿着测线投掷爆炸声源,标称深度为 50 m。实验期间的声速剖面、波导环境等参数与上文数值仿真所用参数一致。两辅助声源的布设位置与数值仿真接近, S_1 在参考阵元 O 的 358.6° 方向、距离 19.67 km 处; S_2 在参考阵元 O 的 269.4° 方向、距离 20.78 km 处,声源的位置信息由船载差分 GPS 获得。由文献[4]可知,当校准声源按照最佳位置关系布放时,声源位置的偏差对阵形校准结果的影响较小。

3.2 处理结果

对接收信号进行 20~30 Hz 带通滤波处理,各阵元接收到的带内信号波形如图 5 所示,图 5(a)为对 S_1 的接收信号,图 5(b)为对 S_2 的接收信号。

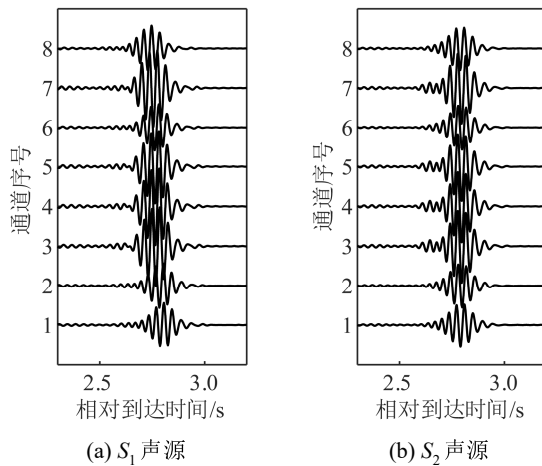


图 5 阵列接收的来自两个声源的信号波形

Fig.5 Signal waveforms received by the array from two sources

对滤波后信号分别用两种方法进行时延估计,得到阵形校准结果如图 6 所示,可以看出校准后阵形与实验预设的直线阵形差别较大。

为了验证校准阵形的有效性,对位于[参考阵元 O 269.4° 方向、距离 21.98 km]的测试声源 S_{test} 的接

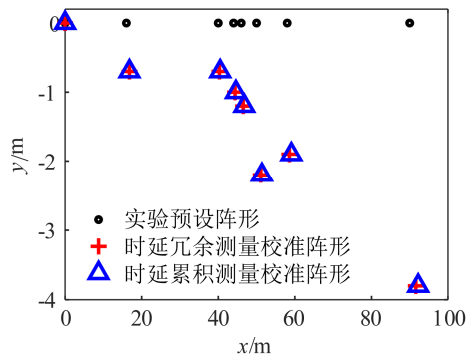


图 6 两种方法进行接收信号时延估计得到的的阵形校准结果

Fig.6 Array shape calibration results obtained by using the two methods to estimate the time delay of array received signals

收信号进行波束扫描,并与实际结果进行比较。

图 7 给出了三种阵形数据对测试声源信号的常规波束形成(Conventional Beamformer, CBF)结果,为了更好体现阵形准确性对目标测向的影响,选择频段为 200~300 Hz。图 7(a)为根据实验预设阵形 CBF 波束扫描结果,其中目标的方位角估计为 88.6° 与 271.4° ,不具备左右舷分辨能力。图 7(b)为根据冗余测量时延估计阵形校准后 CBF 波束扫描结果,其中目标的方位角估计结果为 269.4° 。图 7(c)为根据相邻累积时延估计阵形校准后 CBF 波束扫描结果,目标的方位角估计结果为 269.5° 。由 GPS 测量得到的方位角为 269.4° ,因此可以看出校准后阵形 CBF 测向更准确,验证了所提方法的有效性。

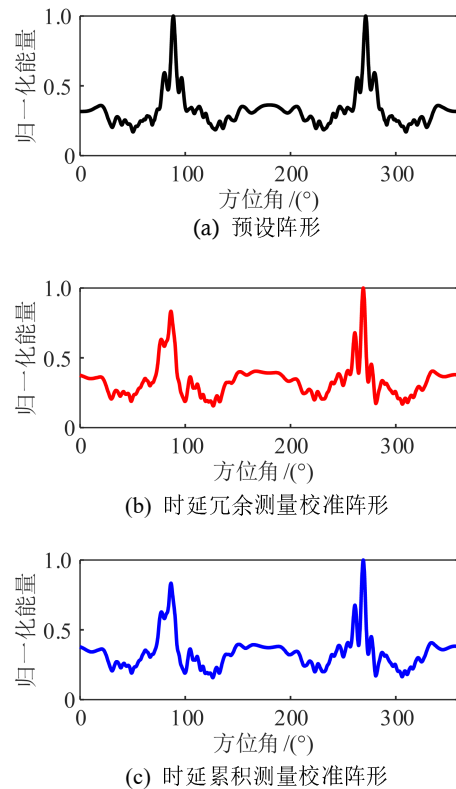


图 7 对图 6 中三种不同阵形的常规波束形成结果

Fig.7 Conventional beamforming results for the three different array shapes shown in Fig.6

3.3 进一步处理

从图 5 可以看出,由于各阵元接收信号的信噪比很高,两种阵形校准方法的差别并不明显。对接收信号添加 10 dB 的高斯白噪声,加噪声后阵列接收信号的时域波形如图 8 所示。进行 50 次蒙特卡洛仿真实验,以分析两种方法的阵形校准结果的稳定性。阵形校准结果如图 9 所示,当接收信号信噪比降低后,图 9(a)中充分利用了信号的空间信息进行冗余时延估计,相较图 9(b)中时延累积方法的阵形校准结果,校准得到的阵元位置更加稳定。

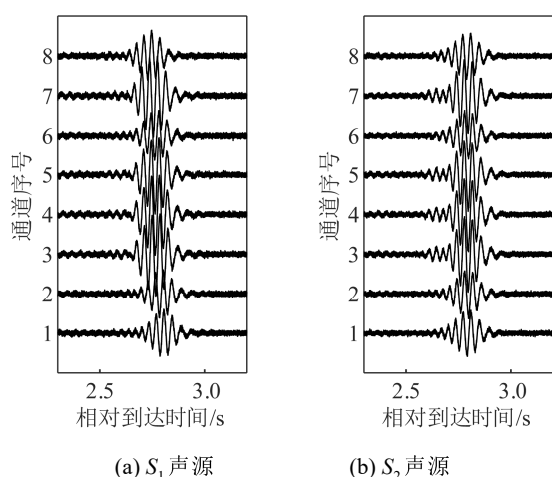


图8 加 10 dB 噪声后阵列接收的来自两个声源的信号波形
Fig.8 Signal waveforms received by the array from two sources after adding 10 dB noise

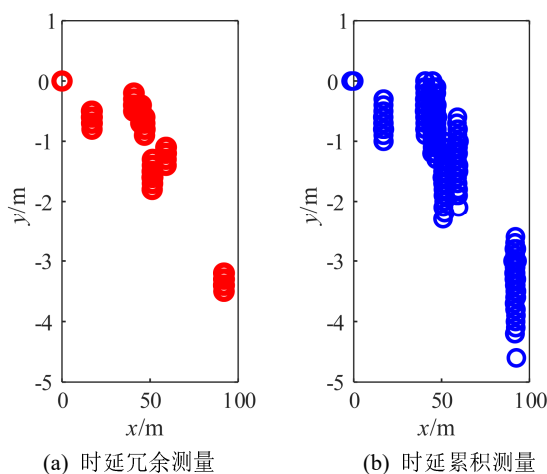


图9 加 10 dB 噪声后的阵形校准结果
Fig.9 Array shape calibration results obtained by using the two methods to estimate the time delay of array received signals after adding 10 dB noise

4 结论

本文提出了一种基于时延冗余测量的阵形校

准方法。数值仿真结果显示,在信噪比偏低时,相较相邻阵元时延累积的阵形校准方法,所提的基于时延冗余测量的阵形校准方法,更充分地利用了阵元的空间信息,可以提高阵形校准精度与稳定性。通过 2020 年某近海实验的数据分析,对所提基于时延冗余测量的阵形校准方法进行了验证,用校准后的阵形进行波束扫描得到的声源方位角与实际值更接近,表明了所提方法可以更准确地给出各阵元相对参考阵元的位置,验证了该方法的有效性。
致谢:感谢参加实验的全体工作人员,他们的辛苦工作为本文提供了宝贵的实验数据。

参 考 文 献

- [1] SEYMOUR L, COWAN C, GRANT P. Bearing estimation in the presence of sensor positioning errors[C]//ICASSP '87. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1987, 12: 2264-2267.
- [2] SABRA K G, ROUX P, THODE A M, et al. Using Ocean ambient noise for array self-localization and self-synchronization[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2005, 30(2): 338-347.
- [3] 杨习山, 李风华, 王翰卓. 利用海洋环境噪声互相关实现阵形校准[J]. 声学学报, 2021, 46(6): 863-870.
YANG Xishan, LI Fenghua, WANG Hanzhuo. Using ambient noise cross correlation for array self-localization[J]. Acta Acustica, 2021, 46(6): 863-870.
- [4] 汪俊, 吴立新, Jim Lynch, 等. 一种基于时延估计的双辅助声源阵形校准方法[J]. 声学学报, 2007, 32(2): 165-170.
WANG Jun, WU Lixin, LYNCH J, et al. A method of array shape calibration based on time delay estimation using two auxiliary sources[J]. Acta Acustica, 2007, 32(2): 165-170.
- [5] 苏晓星, 张仁和, 李风华. 利用波导不变性提高声场的水平纵向相关[J]. 声学学报, 2006, 31(4): 305-309.
SU Xiaoxing, ZHANG Renhe, LI Fenghua. Improvement of the longitudinal correlations of acoustical field by using the waveguide invariance[J]. Acta Acustica, 2006, 31(4): 305-309.
- [6] JENSEN F B, KUPERMAN W A, PORTER M B, et al. Computational Ocean Acoustics[M]. New York, NY: Springer New York, 2011.
- [7] PORTER M B. The KRAKEN normal mode program[CP]. Naval Research Laboratory, 1991.