

◇ 研究报告 ◇

# 利用海洋环境噪声估计海流流速\*

汪 恺<sup>1,2</sup> 李风华<sup>1†</sup> 杨习山<sup>1</sup>

(1 中国科学院声学研究所 北京 100190)

(2 中国科学院大学 北京 100049)

**摘要:** 为了观测海流在短时间尺度上的变化,基于被动声层析原理,提出了一种利用浅海海洋环境噪声估计海流流速的方法。通过波束形成增加噪声互相关函数的能量积累,从环境噪声互相关函数提取出两个水平阵列间的经验格林函数,利用经验格林函数的时间到达结构反演阵列间的浅海海流流速。海上实验数据处理结果表明,该方法提取了 2 h 时间平均的经验格林函数和海流流速,可观测到海流流速的变化。通过仿真,论证了方法在该实验环境下的可行性,并分析了海水深度和传播距离失配带来的流速反演误差,其影响较小,可忽略。

**关键词:** 噪声互相关函数;海流流速;波束形成

中图分类号: O427.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-310X(2022)02-0263-07

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2022.02.012

## Estimation of current speed from ocean ambient noise

WANG Kai<sup>1,2</sup> LI Fenghua<sup>1</sup> YANG Xishan<sup>1</sup>

(1 Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** For the observation of short-time ocean current, a method for estimating the velocity of ocean current using ambient noise is proposed in shallow water based on the passive acoustic tomography. The energy accumulation of noise cross-correlation functions can be increased by beamforming. The empirical Green's functions between two horizontal arrays are extracted from the noise cross-correlation functions, and the time arrival structures of the empirical Green's functions are used to invert the current velocity between arrays. By processing the experimental data, the empirical Green's functions and current velocities are extracted for 2 hours, and the velocity variation of ocean current can be observed. The simulation demonstrates the feasibility of the method in this experimental environment, and the mismatch of depth and range is analyzed. Its effect is negligible.

**Keywords:** Noise cross-correlation function; Current velocity; Beamforming

2021-04-01 收稿; 2021-05-31 定稿

\*国家自然科学基金项目 (11974017, 11874061), 中国科学院青年创新促进会人才项目 (2017028)

作者简介: 汪恺 (1995-), 男, 安徽合肥人, 博士研究生, 研究方向: 水声学。

†通信作者 E-mail: lfh@mail.ioa.ac.cn

## 0 引言

海洋声层析方法自提出至今得到了长久的发展,主要被用来估计海洋声速结构和海流<sup>[1-2]</sup>。过去数十年,诸多远场声传播实验已经验证论述了海洋声层析方法的有效性<sup>[2]</sup>。由于深海声道轴的存在,大部分海流测量实验都在深海进行<sup>[3]</sup>。而浅海环境下,由于声速从海表面到海底变化幅度较小、声线分辨性较差、噪声干扰强烈,因此浅海声层析在海流估计上的应用较少。浅海海域的海流结构以水平的潮汐余流为主。在声传播过程中,海流的流速相对于声速来说是一个极小量,对于声传播时间并不敏感,而且海流方向多变,因此难以将海流流速与声速剖面一起反演。从理论计算上,声层析方法可以应用在海流估计中<sup>[4]</sup>。Kaneko等<sup>[5]</sup>在日本濑户内海进行声层析实验并进行了10 km的二维水平流速场重建,Zhu等<sup>[6]</sup>完成了对中国舟山群岛海域的二维流场重建。Taniguchi等采用声层析方法成功测量了Kuroshio海域的流速垂直分布结构<sup>[7]</sup>,并用同样的方法实现了对吕宋海峡的流速估计<sup>[8]</sup>。但上述海流测量基于的声层析实验或是需要主动发射声源,或者需要长时间接收信号才能对流速进行估计,难以观测海流在短时间尺度上的变化。

通过长时间累积平均的环境噪声互相关函数(Ambient noise cross-correlation function),其时间微分形式与两个接收器间经验格林函数(Empirical Green's function)的时间到达结构已经被论证过是一致的<sup>[9-10]</sup>。在此基础上,Godin等从公路环境噪声成功反演了风速<sup>[11]</sup>,适合进行长期声速观测的被动海洋声层析也得到了迅速发展<sup>[12-13]</sup>。并且,被动声层析方法也更适合人为因素干扰较多的浅海海域。Li等通过波束形成加速能量累积,在2 h时间内提取出两个平行水平阵列间的经验格林函数,准确地反演了2 h平均的声速剖面<sup>[14]</sup>。

本文利用环境噪声互相关提取格林函数在2 h时间尺度上估计海流流速。首先介绍波束形成增强水平阵列间环境噪声互相关函数,计算得到经验格林函数的理论方法。然后依据南中国海海域声层析实验数据,获取经验格林函数的时间到达结构,估计反演2 h平均的海流流速。再给出该海域海流流速仿真计算,验证实验数据处理所获海流流速和理论仿真估计结果的一致性、有效性,并分析海深失配、

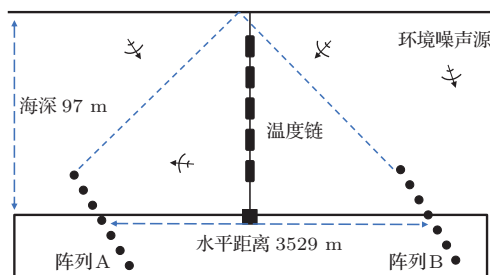
距离失配对流速估计的影响。在此基础上,归纳总结主要结论:基于声层析原理,利用海洋环境噪声可以有效反演估计海流流速。

## 1 理论

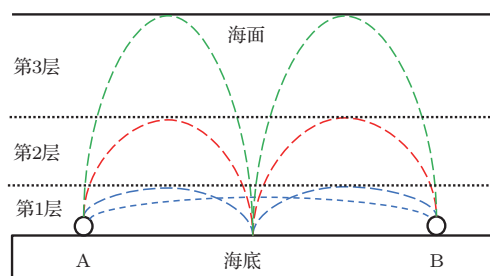
两点间经验格林函数的提取主要是通过累积端射方向上的噪声源能量,因此两个阵列之间的信号可以在端射方向上做波束形成来加快能量累积<sup>[14]</sup>。如图1(a)的设计方案所示,当满足远场假设时,阵列A和阵列B在 $\theta_0$ 方向上波束的频域噪声互相关函数可以用式(1)表达:

$$\begin{aligned} C_{AB}(\omega) &= \mathbf{b}_A(\omega, \theta_0) \mathbf{b}_B^H(\omega, \theta_0) \\ &= \mathbf{W}_A^H(\omega, \theta_0) \mathbf{P}_A(\omega) \mathbf{P}_B^H(\omega) \mathbf{W}_B(\omega, \theta_0), \end{aligned} \quad (1)$$

这里,  $\mathbf{W}_{A(B)}^H(\omega, \theta_0)$  是波束形成的权重向量,  $\mathbf{P}_{A(B)}(\omega)$  是阵列的频域接收信号,  $(\cdot)^H$  是共轭转置,  $\omega$  是角频率,  $\theta_0$  是阵列A的第 $m$ 个阵元指向阵列B的第 $n$ 个阵元的端射方向。



(a) 水平阵列实验布放示意图



(b) 海洋按声线分层示例

图1 被动声层析设计示意图与海洋分层示例

Fig. 1 Schematic design of passive acoustic tomography and an example of ocean stratification

那么,  $\theta_0$  方向上的格林函数就可以从时域噪声互相关函数的时域微分提取出来:

$$\mathbf{G}_{AB}(t) \approx -d\mathbf{C}_{AB}(t)/dt. \quad (2)$$

由于波束形成会过滤掉其他方向上的能量,为了得到反向的格林函数,通过将波束形成指向 $\theta_0$ 的

反方向, 阵列B到阵列A的格林函数也可以同样的形式被提取出来:

$$\mathbf{G}_{\text{BA}}(t) \approx -d\mathbf{C}_{\text{BA}}(t)/dt, \quad (3)$$

其中,  $\mathbf{G}_{\text{BA}}(t)$  相当于未做波束形成时  $\mathbf{G}_{\text{AB}}(t)$  的时间负半轴, 它们间的关系是  $\mathbf{G}_{\text{AB}}(t) = -\mathbf{G}_{\text{BA}}(-t)$ 。

声线到达时间可以依据正反两个方向的格林函数得到。在对海洋进行分层后, 可以将声线轨迹划分为  $N$  层, 图1(b)给出了将海洋划分为3层的例子。此时正反两个方向上第  $i$  条本征声线的到达时间可以通过下式计算<sup>[6]</sup>:

$$t_i^{\text{AB(BA)}} = \sum_{j=1}^N r_{i,j}/(c_j \pm u_j) + t_{\text{err}}, \quad (4)$$

$$i = 1, 2, \dots, M,$$

其中,  $c_j$  和  $u_j$  分别是第  $j$  层上距离平均声速和海流流速,  $r_{i,j}$  代表第  $i$  条本征声线在第  $j$  段路径上的传播路程,  $t_{\text{err}}$  是两个接收器之间的时钟误差。由于  $c_j \gg u_j$ , 忽略小量  $u_j$  后, 两个阵列间的声线传播时间差可以表示为

$$\Delta t_i = t_i^{\text{AB}} - t_i^{\text{BA}} = -2 \sum_{j=1}^N r_{i,j} u_j / c_j^2 + 2t_{\text{err}}, \quad (5)$$

$$i = 1, 2, \dots, M,$$

其中,  $t_{\text{err}}$  可以通过从所有声线中减去特定的声线传播时间差来消除, 通过求解式(5), 即可得到相关海域的各层海流流速。如果对海洋不进行分层的话, 这里求解式(5)将退化为

$$u_1 = -(\Delta t_i - 2t_{\text{err}})c_1^2/2r_{i,1}. \quad (6)$$

## 2 实验

### 2.1 实验描述

在海南岛东南近海进行了一次声层析实验, 实验环境如图1(a)所示, 在海深97 m的平坦海底布放两个连接的水平线阵, 两者大致平行, 相距3529 m。并且每个阵列有15个等间距间隔6 m的阵元, 实际阵列长度大约为84 m。水听器以5000 Hz的采样率同步连续不断地记录宽带的海洋环境噪声信号。同时在实验期间, 一条包含38个温深仪的温度链被竖直布放在两个水平阵列的中央, 用以记录水体大约2.5~95.0 m深度范围的水文数据。分别使用了4段

海洋噪声接收信号, 具体测量时间如表1所示, 对应的部分水文数据如图2所示。

表1 噪声信号接收时间

Table 1 Noise signal receiving time

序号	日期	持续时间/h
1	2017/12/07, 03:00–12/09, 03:00	48
2	2017/12/21, 11:00–12/22, 01:00	14
3	2018/04/24, 12:35–04/25, 15:00	26.5
4	2018/05/07, 12:25–05/10, 12:30	72

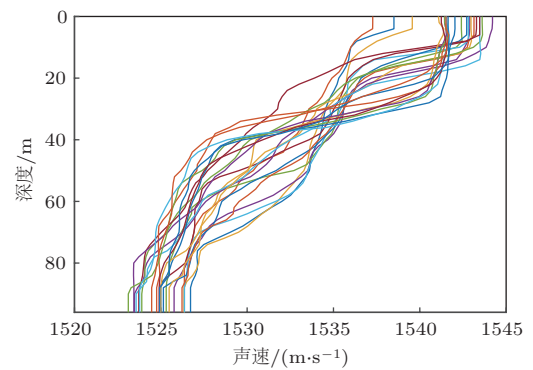


图2 温度链实际测量的声速剖面

Fig. 2 Sound speed profiles measured by temperature chain

### 2.2 数据处理

将每个阵元接收的海洋噪声信号按每2 h分为一个时间段后, 按10 s一拍对各段时域信号进一步划分。在快速傅里叶变换后, 对每个快拍的频域信号做40~350 Hz的带宽滤波。对滤波后的频域信号做波束形成来加快能量累积, 提升信噪比, 波束形成的参考声速设置为1530 m/s。对各快拍的波束输出累积求和后, 可以在2 h时间上平均得到累积波束输出。因此, 2 h时间累积的噪声互相关函数可以通过式(1)计算得到。接着通过式(2)~(3)端射方向上的经验格林函数即可被提取出来。

由于两个水平线阵在物理上相互连接, 因此两个阵列的水听器记录的噪声信号都是同步且连续的, 因此式(5)~(6)中  $t_{\text{err}}$  可以忽略不计。由于声线传播的多途效应, 没有经过海面反射的本征声线以及前两次海面反射波都混在了第一个信号包络中<sup>[14]</sup>。第一个信号包络中各组本征声线难以辨别区分, 而后续包络的本征声线都穿过了水体所有深度, 因此难以对海洋进行分层。第二个信号包络对

应了海面三次反射波,物理意义清晰。所以,通过式(6),在利用几何关系计算声线路径长度后,不对海洋进行分层,第二个信号包的时延差被用来计算估计海域深度上平均的海流流速。

### 2.3 实验结果

定义从阵列A到阵列B为正向,提取出端射方向的经验格林函数。图3展示了自2 h累积噪声互相关函数提取出的经验格林函数的正半轴部分,共有48 h。可以从图中看到,在2 h累积时间下,到达波的信号包络都比较清晰稳定。

同时,图4展示了端射方向上提取出的一组经验格林函数,其中图4(a)将两个经验格林函数以正负时间轴的形式统一归一化,图4(b)为正反向分别归一化后的格林函数。可以从图4(a)看出,正反两

个方向上信号在统一归一化后反方向的格林函数信噪比更高。

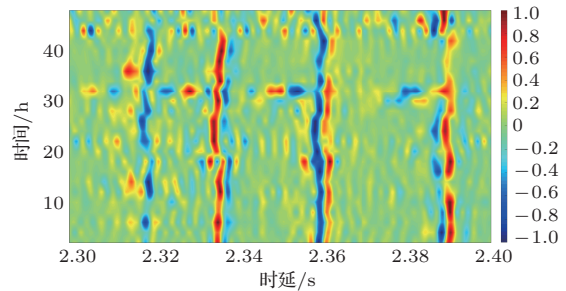


图3 从2 h噪声互相关函数中提取的正向格林函数,共持续48 h

Fig. 3 Positive Green's functions extracted from the 2-hour noise cross-correlation functions for a total of 48 hours

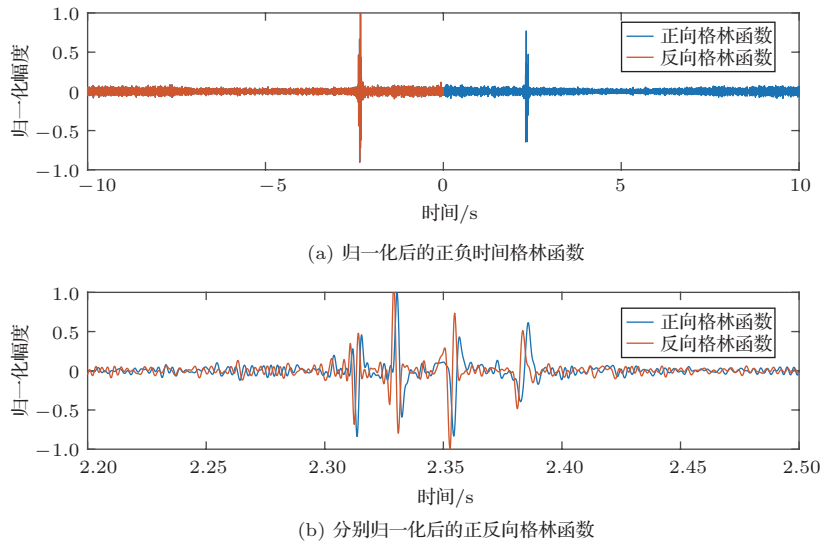


图4 自2 h噪声互相关函数提取出的一组格林函数

Fig. 4 A Green's function extracted from the 2-hour noise cross-correlation function

图5展示了两个水平阵列之间端射方向上海流流速的反演结果。通过计算如图4(b)所示的第二个信号包的时延差,在2 h时间尺度内计算估计出了海流流速。

### 2.4 实验分析

图3展示了连续48 h的经验格林函数,可以发现在2 h的时间累积下,大部分时间到达结构都比较清晰,但也存在个别到达波的包络不清晰。这是因为在该累积时间段内,端射方向上噪声源较弱,没有足够的能量积累,可以通过延长累积时间来提高格林函数的信噪比。

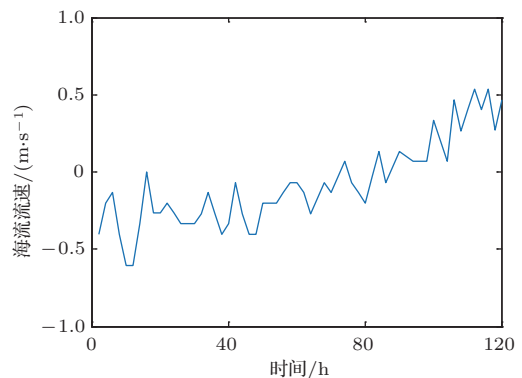


图5 从2 h经验格林函数计算得到的海流流速

Fig. 5 Current velocities calculated from 2-hour empirical Green's functions



从图4(a)中可以看到在正反两个方向上所提取出的经验格林函数信噪比并不一致,这是由于在实际海洋环境中噪声源分布是不均匀的。同时从图4(b)中可以看到尽管信噪比存在差异,但正反两个方向上得到的经验格林函数时间到达结构都清晰明确,已经足够提取得到到达时延来进行后续的流速计算。

图5展示了从第二个信号包络时延差计算估计的海流流速,其数值范围在50 cm/s以内。附近海域历史测量平均流速为52 cm/s,最大流速109 cm/s,最小流速为18 cm/s<sup>[15]</sup>,考虑到海流的方向与实验波束形成指向的不同,反演结果落在历史测量的合理范围内。从图5中可以看到海流流速在2 h时间尺度上随时间的变化趋势,同时随着季节改变,海流方向也发生了改变。已有的研究表明,海南岛东南海域受南中国海大尺度表层环流的影响,海流在夏季和冬季分别以东北向和西南向流为主<sup>[15]</sup>,海流方向发生改变符合历史实际观测结果。

### 3 射线理论仿真

#### 3.1 仿真与结果

通过射线追踪方法可以对两点之间的声传播过程进行仿真<sup>[16-17]</sup>。仿真使用的是由温度链实际测量的一组声速剖面,海流流速则采用恒定流速剖面,分别设置为1 m/s、0.5 m/s和0.2 m/s。两点之间的距离设置为3500 m,海底声速由头波反演得到设置为1603 m/s,海底密度为1.9 g/cm<sup>3</sup>,吸收系数为0.5 dB/ $\lambda$ ,其余参数与实验参数一致。

图6展示了仿真环境下的本征声线轨迹。可以从图6中发现,虽然本征声线可以直观分为直达波、海底一次反射以及海面反射3组声线,通过3组声线穿过水体的深度不同来对水体进行分层来估计流速,但在与仿真对应的实际实验环境中,直达波、海底一次反射波以及海面二次反射都对应着图3和图4(b)中第一个到达的信号包络,难以区分,因此在实际的浅海环境中很难通过将射线分为3组来对海流流速进行分层估计。

表2列出了3组声线的到达时间和利用3次海面反射波的到达时间估计出的海流流速。从表2中可以看出反演的海流流速与仿真的实际环境十分接近。

表2 仿真反演的结果

Table 2 Results of simulation inversions

仿真流速/ (m·s <sup>-1</sup> )	正向传播 时间/ms	反向传播 时间/ms	反演流速/ (m·s <sup>-1</sup> )
1	2309.6	2312.6	0.996
0.5	2310.3	2311.8	0.498
0.2	2310.8	2311.1	0.199

#### 3.2 误差分析

格林函数的到达时间主要受声线在水体中传播的距离影响,对应的主要不确定性在于海水深度。在声线传播过程中,如果海底深度发生变化,声线轨迹将会发生变化,极大地影响声线传播时间。而实际实验时,海底深度失配也是通常无法回避的问题。

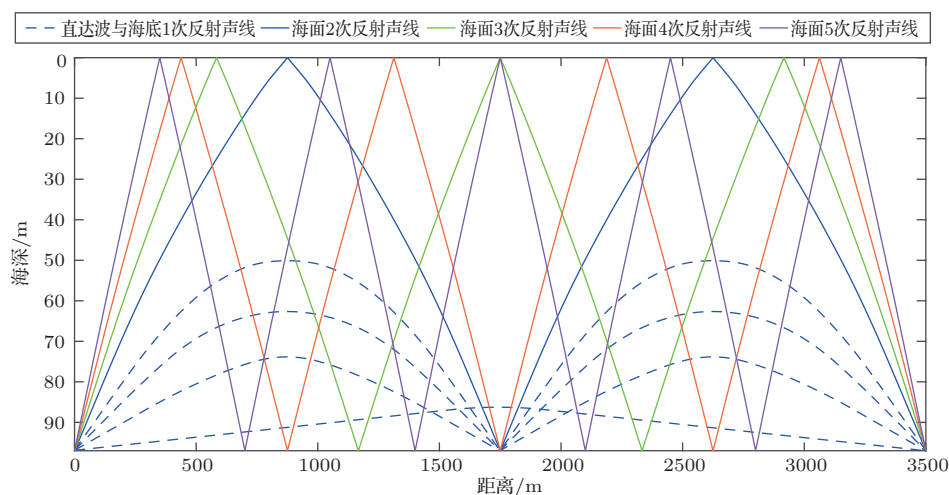


图6 基于射线理论仿真得到的本征声线轨迹

Fig. 6 The simulated eigen rays trajectory based on the ray theory

表3比较了不同海底深度条件下对3次海面反射波传播时间和反演结果的影响,  $\Delta z$  为正表示计算时海底深度大于实际海底深度, 仿真所用参数与3.1节参数一致, 仿真流速设定为恒定1 m/s。可以从表3中发现本实验环境下深度失配对正反向声传播时间影响较小。虽然通过计算时延差, 可以消除部分误差, 但如果时延差未能完全消除误差时, 0.1 ms的时延误差将带来约0.033 m/s的流速估计误差。仿真表明在本实验环境下, 5 m左右的深度失配可能会轻微影响流速反演的结果, 因此实际实验时, 应当选择海底平坦、深度稳定的海域, 尽量精确地测量海水深度, 以此来更好地保证流速反演结果的准确性。

同样在实验环境中, 两个阵列间的距离也往往受实际布放原因而产生误差, 通过改变仿真中两点之间的距离, 比较了距离扰动下流速的估计结果仿真的结果。表4列出了在仿真条件正负100 m距离扰动下对反演结果的影响, 其中  $\Delta d$  为正表示计算时距离大于实际距离。可以看到即使距离有着100 m的扰动, 正反向声传播时间有着较大误差, 但通过计算时延差, 两者的误差可以消除。在实验中通常距离不确定性远小于100 m, 因此距离上的失配对流速估计精度影响很小, 一般情况下可以忽略。

表3 不同海深仿真反演结果

Table 3 Results of simulation inversions with different sea depths

$\Delta z/\text{m}$	正向传播时间 误差/ms	反向传播时间 误差/ms	反演误差/ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )
5	3.2	3.3	0.033
2	1.3	1.3	0
1	0.6	0.7	0.033
0	0	0	0
-1	-0.7	-0.7	0
-2	-1.3	-1.3	0
-5	-3.2	-3.3	-0.033

表4 不同距离仿真反演结果

Table 4 Results of simulation inversions with different distances

$\Delta d/\text{m}$	正向传播时间 误差/ms	反向传播时间 误差/ms	反演误差/ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )
100	64.2	64.2	0
0	0	0	0
-100	-64.2	-64.2	0

4 结论

本文提出了一种利用浅海海洋环境噪声互相关函数估计海流流速的方法。本方法基于声层析原理, 采用波束形成增加能量积累, 可以在2 h时间尺度内提取海洋环境噪声互相关函数; 计算获得正反两个方向上的格林函数及其时间到达结构, 反演估计出每2 h的海流流速, 从而可以观测流速较长期的变化趋势; 流速反演估计值和变化趋势符合历史观测研究的结果, 且和理论仿真计算结果一致性好; 海水深度和距离失配误差对流速估计精度影响小, 可忽略。基于声层析原理, 利用海洋环境噪声可以有效反演估计海流流速。

本文没有使用声学多普勒声速仪<sup>[18]</sup>对海流流速进行实时同步的测量, 后续的实验应当实测海流流速, 用以对比论证实验反演结果的精度。此外, 实验使用的水听器采样率为5000 Hz, 也就是时间采样间隔为0.2 ms, 因此目前只能对海流流速的变化趋势进行大致观测, 后续实验将通过使用更高采样率的设备, 来获取更精确的声传播时间, 以此实现对海流流速的高精度估计。

参 考 文 献

[1] Wenz G M. Acoustic ambient noise in the ocean: spectra and sources[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1962, 34(12): 1936–1956.

[2] Munk W, Wunsch C. Ocean acoustic tomography: a scheme for large scale monitoring[J]. Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers, 1979, 26(2): 123–161.

[3] Morawitz W M L, Sutton P J, Worcester P F, et al. Three-dimensional observations of a deep convective chimney in the Greenland Sea during winter 1988/89[J]. Journal of Physical Oceanography, 1996, 26(11): 2316–2343.

[4] 郝爽, 宋扬, 邢传玺. 基于海洋声层析方法的海流流速反演研究 [C]. 2016'中国西部声学学术交流会议论文集, 2016.

[5] Kaneko A, Yuan G, Gohda N, et al. Optimum design of the ocean acoustic tomography system for the Sea of Japan[J]. Journal of Oceanography, 1994, 50(3): 281–293.

[6] Zhu X H, Kaneko A, Wu Q, et al. The first Chinese coastal acoustic tomography experiment[C]//OCEANS'10 IEEE SYDNEY. IEEE, 2010: 1–4.

[7] Taniguchi N, Huang C F, Kaneko A, et al. Measuring the Kuroshio Current with ocean acoustic tomography[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2013, 134(4): 3272–3281.

[8] Taniguchi N, Kaneko A, Yuan Y, et al. Long-term acoustic tomography measurement of ocean currents at the

- northern part of the Luzon Strait[J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(7): L07601.
- [9] Roux P, Kuperman W A, NPAL Group. Extracting coherent wave fronts from acoustic ambient noise in the ocean[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2004, 116(4): 1995–2003.
- [10] Godin O A. Recovering the acoustic Green's function from ambient noise cross correlation in an inhomogeneous moving medium[J]. *Physical Review Letters*, 2006, 97(5): 054301.
- [11] Godin O A, Irisov V G, Charnotskii M I. Passive acoustic measurements of wind velocity and sound speed in air[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2014, 135(2): EL68–EL74.
- [12] 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.
- [13] Godin O A, Zabotin N A, Goncharov V V. Ocean tomography with acoustic daylight[J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(13): L13605.
- [14] Li F, Yang X, Zhang Y, et al. Passive ocean acoustic tomography in shallow water[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2019, 145(5): 2823–2830.
- [15] 卢燕, 李泽文, 李淑江, 等. 海南万宁近岸余流特征分析[J]. *海洋科学进展*, 2017, 35(1): 53–61.  
Lu Yan, Li Zewen, Li Shujiang, et al. Subtidal current in the southeast of shore area of Hainan[J]. *Advances in Marine Science*, 2017, 35(1): 53–61.
- [16] 刘伯胜, 雷家煜. 水声学原理[M]. 哈尔滨: 哈尔滨船舶工业学院出版社, 1993.
- [17] Jensen F B, Kuperman W A, Porter M B, et al. *Computational ocean acoustics*[M]. Des Moines: Springer Science & Business Media, 2011.
- [18] 胡平, 李文杰. ADCP 声波流速流向剖面仪在海洋环境监测与评价中的应用[J]. *物探与化探*, 2004, 28(4): 341–344.  
Hu Ping, Li Wenjie. The application of ADCP to marine environmental monitoring and evaluation[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2004, 28(4): 341–344.