高频声学流速层析研究

俞晓华^{1*}, 林松², 庄小冰², 郭宜君², 李焱龙³

1. 闽南师范大学生物科学与技术学院, 漳州 363000;

2. 厦门大学海洋与地球学院水声通信与海洋信息技术教育部重点实验室, 厦门 361005;

3. 厦门大学建筑系, 厦门 361005

*联系人, E-mail: jen_yu@163.com

收稿日期: 2020-03-27; 接受日期: 2020-06-01; 网络出版日期: 2020-12-23

福建省产学研(编号: 2018Y4012)、国家自然科学基金(编号: 41676023, 41276040)和国家重点研发项目(编号: 2016YFC0502901)资助

摘要 海陆界面是人类海洋开发活动最为集中的区域, 流速在线监测对于其物质通量和生态系统演变极其重要. 本文研究了小尺度海陆界面的高频声学流量层析, 基于声互易传输原理构建河流平均流速和流量的声学反演算法, 并在漳州九龙江海陆界面开展验证实验. 应用高频换能器(中心频率为60 kHz, 带宽为40–80 kHz)进行互易收发. 根据声速剖面和水下地形测量, 开展射线声学数值模拟, 揭示高频声传播规律. 实验测量表明, 声信号具有较高的信号幅度和互相关峰值, 能够反演河流的平均流速和流量, 并对台风“海贝思”期间河流平均流速和流量实现动态监测. 研究表明, 高频声层析可应用于海陆界面水动力研究、水文测量、洪峰和强降雨等极端事件的监测与预报等.

关键词 高频声层析, 海陆界面, 流量监测

PACS: 43.30.Wi, 43.30.Pc, 43.60.Cg, 43.60.Pt

1 引言

海陆界面衔接海洋与陆地, 是人类海洋开发活动最为集中的区域, 水动力复杂^[1]. 我国近岸海域污染日益严重, 追根溯源, 绝大部分污染物质来自流域陆地通过海陆界面输送入海. 紧扣国家对近海-流域生态安全和防灾减灾的重大需求, 研发海陆界面河流入海的流量在线监测极其重要.

目前对浅海、河口水域的流速主要采用机械式流量计、声学多普勒流速剖面仪(ADCP)等方法进行定

点或走航式测量^[2–7]. 这些方法只能监测小范围流速, 不能同时反映出大范围水域的平均流量. 此外, 走航测量受渔业及航运影响. 特别是在强降雨、洪峰、台风等极端天气下, 走航测量实施困难.

海洋复杂环境对声传播规律影响很大^[8–10]. 声层析利用声波穿透整个水体以获得该区域的平均温度、流速要素, 可以克服走航测量的不足, 在流域声学研究与技术应用中发挥重要作用. 国内外学者对低频声层析开展了深入研究. Munk和Wunsch等人^[11–13]提出利用海洋声层析获得大面积水体的温度、流速等参数,

引用格式: 俞晓华, 林松, 庄小冰, 等. 高频声学流速层析研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2021, 51: 024301

Yu X J, Lin S, Zhuang X B, et al. Study of high-frequency acoustic current tomography (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2021, 51: 024301, doi: [10.1360/SSPMA-2020-0100](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2020-0100)

受到了广泛关注. 1991年, 赫德岛可行性测试对大洋尺度的声传输进行了验证. 北冰洋声传输实验以及海洋气候声学测温实验证明了低频声层析对大尺度区域进行平均温度、流速测量的有效性^[14,15]. 近年来, 中频声层析在观测海湾、近岸海区的温流分布方面得到了初步应用^[16-21]. 日本广岛大学运用固定式声层析仪, 在濑户内海、关门海峡、东京湾、吕宋海峡等海区进行了二维流场的声层析观测. 国内, 自然资源部第二海洋研究所、浙江大学和厦门大学等单位开展了沿海声层析流场反演研究^[22-28]. Zhu等人^[22]利用5 kHz中频海洋声层析仪在舟山群岛头洋、三门湾、螺头水道进行了观测实验, 重建了二维流场. 赵航芳等人^[23]分析了声层析基本理论和早期实验发展, 并探讨了声层析发展趋势. 何利等人^[25]利用水平和垂直阵列进行了浅海声速剖面的匹配场层析反演. 廖光洪等人^[26]进行了声层析二维流场反演. 李建龙等人^[27]研究了声层析的数据同化方法. 然而, 现有中、低频声层析技术可应用于数十到数千公里的中、大尺度范围, 但对于数公里以下的小尺度海陆界面, 声传播时间测量误差大, 无法满足流量在线监测的需求, 有必要发展高频声层析技术^[29-32]. 因此, 本文开展高频声层析研究, 基于声互易传输原理, 建立河流平均流速和流量的反演算法. 在漳州九龙江海陆界面开展高频声层析现场实验, 研究河流平均流速和流量反演, 并对台风“海贝思”期间河流流量变化实现动态监测.

2 模型与方法

在高频条件下, 声传播可以用射线声学来描述. 声线的轨迹和传播时间对应于高频声传播的路径和时间^[33]. 本文采用的高频声层析互易传输是一种基于时间传播的声场反演方法. 在被测河流的两岸设置声学观测站A和B(图1). 每个站点配备有高频声发射换能器、接收水听器以及用于同步授时的GPS, 能够进行A→B和B→A的声互易发射和接收. 当水域存在声速变化 $\delta c(x, y, z)$ 和流速 $\mathbf{u}$ 时, A、B两点之间声线互易传输的时间可描述为^[18-20,29]

$$T^{\pm} = \int \frac{ds}{c_0 + \delta c \pm \mathbf{u} \cdot \mathbf{n}} = T_0 + \delta T^c \pm \delta T^u, \quad (1)$$

其中 T^+ , T^- 表示A→B正方向和B→A反方向的声传播

时间, c_0 为参考声速.

在互易工作方式下, L 为A、B站位间的距离, 则 $T_0 = L/c_0$ 为根据参考声速计算的声传播时间. $\mathbf{n}$ 为沿声线路径正方向的方向向量, δT^c 和 δT^u 分别是由声速扰动和河流流速引起的声传输时间变化. 在 $\delta c \ll c_0$ 和 $\mathbf{u} \ll c_0$ 的微扰条件下, 对方程(1)声传输时间变化取一阶线性近似, 可分别得到以下式子:

$$\begin{aligned} \delta T^c &\approx - \int \frac{\delta c ds}{c_0^2}, \\ \delta T^u &\approx - \int \frac{\mathbf{u} \cdot \mathbf{n} ds}{c_0^2}. \end{aligned} \quad (2)$$

假设 θ 为声传播路径与河水流向的夹角, 则可以得到 $\mathbf{u} \cdot \mathbf{n} = u \cos \theta$. 因此, 由 T^+ , T^- 的和与差可以反演河流的平均声速和流速:

$$\begin{aligned} c &\approx \frac{2L \cos \theta}{T^+ + T^-}, \\ u &\approx \frac{c_0^2 (T^- - T^+)}{2L \cos \theta}. \end{aligned} \quad (3)$$

进一步, 根据温度-声速关系, 从获得的平均声速, 可以反演水体的平均温度^[32,34]. 特别是, 在声传播路径的斜断面面积 S 已测定的条件下, 河流的流量 U 可由流速 $\mathbf{u}$ 和垂直断面面积的乘积来估算, 即通量可反演为

$$U \approx \mathbf{u} \times S \times \sin \theta. \quad (4)$$

根据以上声互易传输模型, 本文研发了高频声层析系统, 其系统流程如图1所示, 分为控制、发射、接收三部分. 控制部分包括工控机和NI USB-6216采集卡(采样率 $f_s=400$ kS/s). 发射部分包括功率放大模块(增益0–200 W可调)以及WBT-60水声发射换能器(中心频率60 kHz, 带宽40–80 kHz). 接收部分包括RHSA-10水听器(灵敏度 -185.1 – -189.2 dB, 带宽1–200 kHz)、40–80 kHz带通滤波放大模块以及滤波放大模块. 该系统使用GPS模块(精度20 ns)进行授时以及脉冲同步.

声发射系统由计算机控制端产生一个由六阶 m 序列调制正弦波的载波信号. 用GPS模块产生同步时间, 发射端在设定时间下发射信号. 利用数据采集卡将载波信号进行D/A转换. 功放板放大后加载到水声换能器上发出.

声接收系统由水听器接收声信号. 由A/D转换为数字信号, 经过八阶巴特沃斯带通滤波器(带宽40–

图 1 (网络版彩图)高频声层析流量测量系统示意图

Figure 1 (Color online) Systematic diagram of high frequency acoustic current tomography.

80 kHz)滤波、放大, 然后进行解调. GPS模块控制计算机在设定的时间接收信号.

采用LabVIEW编写用户程序来控制声发射和接收过程. 在GPS设定的时间, 一站位发射声信号 $x(n)$, 另一站位也同时接收信号 $y(n)$. 声信号传输时间可以通过以下互相关检测算法来计算^[29]:

$$R_{xy}(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot y(n+k), \quad (5)$$

其中, N 为声发射信号 $x(n)$ 的数据长度. 对于A站发射声信号, B站接收, 若A, B站声信号的互相关函数 R_{xy} 在某个时间 $k = k_0^+$ 处取最大值, 则表明此时声信号已经到达B站接收端. 因此, A, B站之间声信号的传播时间为: $T^+ = k_0^+ / f_s$. 经过5 s后, 系统设置A, B站位变换互收发工作状态. 由B站发射声信号, A站接收, 若B, A站声信号的互相关函数 R_{xy} 在时间 $k = k_0^-$ 处取最大值, 则表明此时声信号已经到达A站接收端. 因此B, A站之间声信号的传播时间为: $T^- = k_0^- / f_s$. 根据方程(3)和(4)可以反演出河流的平均流速和流量.

流速反演误差主要取决于时间精度^[35]. 由方程(3)可以看出, $\delta u \sim \frac{c_0^2}{L \cos \theta} \delta t$. 在 L 一定的条件下, 反演误差随着声发射时间精度和声接收采样率的降低而增大. 在声发射时间精度和采样率一定的条件下, 反演误差随

着 L 的增大而减小^[11-14,17-23]. 本研究中GPS授时精度为20 ns, 其对结果的影响可以忽略不计. 声接收数据采集卡每个采样点的时间精度为2.78 μ s. 声发射时间精度决定了相关峰判断. 互相关分析中最小时间间隔为 f_s/f_c , 则对应的时间精度为 $1/f_c$. 对于 $\theta=50^\circ$, $L=1000$ m, $f_c=60$ kHz而言, 可以算出接收采样时间精度产生的流速反演误差为0.005 m/s, 发射时间精度产生的流速反演误差为0.028 m/s. 因此, 对于小尺度海陆界面, 采用高频声波和高时间精度GPS定时技术可以获得可靠的流速反演结果.

3 结果与讨论

本文研究区域位于福建省漳州市的九龙江海陆界面. 九龙江是福建省第二大河流. 九龙江过漳州在厦门港两岸注入台湾海峡, 具有典型的海陆界面. 研究九龙江海陆界面的流量监测对于该流域污染控制、防灾减灾、空间规划有重要意义. 本研究在九龙江北溪两侧分别建立了高频声学监测站, 可以将水温、流速、水位等数据实时上传至服务器的数据平台, 实现在线监测.

为了验证高频声层析模型并指导现场实验测量, 本文先对漳州九龙江海陆界面(117.7838°E, 24.5245°N)的水下环境场进行实验测量并开展高频声传播规律理论分析. 2017年3月16日午时对研究区域进行地形和声速剖面测量. 在A, B站点之间, 利用回声探测仪(Echosounder)和温盐深仪(CTD)进行Z字形的走航测量. CTD可以获得该研究区域的温度或声速剖面, 如图2(a)所示. 随着深度的增加, 声速有一定的增加. 此外, Echosounder的回声信号强度反映了水下环境的声散射属性. 硬质河底将产生强烈的回波信号. 从Echosounder获得水下声纳图像的高亮域可以确定河底的地形分布, 如图2(b)所示. 可以看出, 该区域水深不超过20 m, A-B斜断面的截面积为2800 m². 水下地形表现为中间深、两侧浅. A, B两个站点距离仅为 $L=390$ m. 因此, 现有的中、低频声层析技术^[8-22]对于这样小尺度的海陆界面难以获得准确的声传播时间和河流流速.

根据声速剖面 and 地形测量结果, 开展高频射线声学的数值模拟. 声发射和接收位置如图2所示. 结果表明, 高频声传播具有明显的多途效应: 一定倾角发射的

图 2 (网络版彩图) (a)九龙江海陆界面声速剖面 and (b)水下地形和高频多途声传播

Figure 2 (Color online) Jiulongjiang sea land interface. (a) Sound velocity profile of Jiulongjiang sea land interface and (b) underwater topography and high frequency multipath sound propagation.

声信号在前100 m水面-河底发生严重的界面反射, 存在显著的传播损失; 直达声(红线)没有受到水面、水底反射, 因而接收到的声能最强; 水面一次反射声(蓝色)和水面-河底多次反射声的传播时间较长, 可以通过互相关分析, 在到达时间上与直达声分开. 因此, 仿真模拟表明可以在接收点测量直达声线来反演河流的平均流速.

进一步, 在漳州九龙江区域开展实验验证. 水声换能器和水听器放在水下1 m处. 图3(a)显示了在A点发射/B点接收和B点发射/A点接收的互易工作方式下, 接收端测量的声信号. 图3(b)给出了A, B两个站点声发射与接收信号的互相关分析结果. 尽管存在水下环境噪声干扰, 声学系统采用编码、滤波和放大后, 接收到声信号的幅度和相关峰值均充分大于背景噪声. 水声信号能够被有效地接收和探测. 此外, 相关峰的最大值对应于声波到达接收端的时刻. 采用授时精度为20 ns的GPS, 可以确定A点发射/B点接收时的声传播时间为 $T^+=0.263791667$ s, 而B点发射/A点接收时, 声传播时间为 $T^-=0.263833333$ s. 根据方程(3), 反演出河流的平均流速为0.182 m/s. 利用声层析流量反演式(4), 可以估算实验中九龙江北溪的流量为299 m³/s, 与根据浦南水文站流量测量结果基本一致^[36].

图 3 (网络版彩图)高频声层析实验中A站和B站接收的水声信号(a)和互相关分析结果(b)

Figure 3 (Color online) High frequency acoustic tomography experiments. (a) Underwater signals and (b) correlation analysis of instrument A and B.

特别是, 高频声层析测量系统安装于河流两侧, 不会干扰航道, 可用于强降雨、洪峰、台风等极端天气下的流量监测. 2014年6月16日第7号台风“海贝思”期间, 漳州地区受台风影响, 大量降雨. 高频声层析系统反演了九龙江北溪流速在台风期间的变化, 如图4(a)所示. 凌晨3时, 河流流速大约为0.2 m/s. 随着九龙江地区雨量增大, 流速保持增长趋势. 晚上20时, 流速达到峰值, 约为1.9 m/s, 河流水位暴涨, 水流湍急. 此外, 比较高频声层析流量反演与浦南水文站的流量实测结果, 浦南水文站测量的流量数据为每小时测量一次, 而高频声层析方法能够提供更为密集流量测量. 进一步, 水文站测量流量变化趋势与声层析方法反演流量的趋势一致. 流量从凌晨约380 m³/s开始增大, 到20时达到峰值1900 m³/s. 图4(b)的线性回归分析表明二者具有良好的线性关系($R^2=0.95$), 满足如下方程:

$$U(\text{实测})=0.459U(\text{声层析反演})-56.086, \quad (6)$$

图 4 (网络版彩图) (a) 流量实测结果; (b) 高频声层析流速反演; (c) 声层析流量反演与实测流量对比

Figure 4 (Color online) (a) Current measurement results; (b) velocity reconstruction of high frequency acoustic tomography; (c) the comparison of reconstructed and measured currents.

其中, 系数0.459为回归分析得到的拟合系数结果, 与河流截面面积 S 和河流流向 θ 等参数有关. 由于声层析反

演计算时采用的 $S \times \sin\theta$ 不等于河流垂直截面(图2), 需要对该截面进行进一步实验测量. 从式(6)可见, 高频声层析流量反演与实测流量有显著的线性关系. 此外, 近来研究表明, 高频声层析反演的温度与原位温度测量结果具有很好的线性相关性, 验证了高频声层析温度反演的有效性^[32]. 本研究的实验验证进一步表明, 高频声层析可以对九龙江海陆界面的平均流速和流量进行测量, 并对台风极端事件进行在线监测, 该方法也可推广到其他小尺度海陆界面流量监测的应用场景.

4 结论

本文基于声互易传输原理, 研究了高频声学流量层析, 建立了河流平均流速和流量的反演算法, 并在漳州九龙江海陆界面开展高频声层析验证实验. 根据声速剖面和水下地形测量结果, 开展射线声学数值模拟, 揭示高频声传播规律. 结果表明, 声信号具有较高的信号幅度和互相关峰值, 能够有效地反演河流平均流速和流量. 此外, 对台风“海贝思”期间九龙江平均流速和流量变化实现动态监测, 声层析流量反演与实测流量显示了显著的线性关系. 本文研究表明高频声层析可以应用于小尺度海陆界面的水动力研究, 并有望对强降雨、洪峰、台风等极端事件进行在线流量监测与预报, 有重要的科学意义和应用价值.

参考文献

- Paerl H W. Assessing and managing nutrient-enhanced eutrophication in estuarine and coastal waters: Interactive effects of human and climatic perturbations. *Ecol Eng*, 2006, 26: 40–54
- Geawhari M, Huff L, Mhammdi N, et al. Spatial-temporal distribution of salinity and temperature in the Oued Loukkos estuary, Morocco: Using vertical salinity gradient for estuary classification. *SpringerPlus*, 2014, 3: 643
- Jeffries K M, Connon R E, Davis B E, et al. Effects of high temperatures on threatened estuarine fishes during periods of extreme drought. *J Exp Biol*, 2016, 219: 1705–1716
- Ruberg S, Brandt S, Muzzi R, et al. A wireless real-time coastal observation network. *Eos Trans AGU*, 2007, 88: 285–286
- De Serio F, Mossa M. Analysis of mean velocity and turbulence measurements with ADCPs. *Adv Water Resour*, 2015, 81: 172–185
- Pavelsky T M. Using width-based rating curves from spatially discontinuous satellite imagery to monitor river discharge. *Hydrol Process*, 2014, 28: 3035–3040
- Blume T, van Meerveld I, Weiler M. The role of experimental work in hydrological sciences—Insights from a community survey. *Hydrol Sci J*, 2016, 62: 334–337
- Hu Z G, Li Z L, Qin J X, et al. The effects of the sloping bottom environment on sound propagation in deep water (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2016, 46: 094304 [胡治国, 李整林, 秦继兴, 等. 深海海底斜坡环境对声传播规律的影响. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2016, 46: 094304]
- Zhang R H, Li Z L, Peng Z H, et al. Overview of shallow water acoustics (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2013, 43: 2–15 [张仁和, 李整

- 林, 彭朝晖, 等. 浅海声学研究进展. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2013, 43: 2–15]
- 10 Wang H Z, Wang N, Gao D Z, et al. On the relation between cross-correlation of reverberation and Green's function in shallow water (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2013, 43: s106–s111 [王好忠, 王宁, 高大治, 等. 浅海混响互相关函数与格林函数的关系. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2013, 43: s106–s111]
- 11 Munk W, Wunsch C. Ocean acoustic tomography: A scheme for large scale monitoring. *Deep Sea Res*, 1979, 26: 123–161
- 12 Munk W H, Forbes A M G. Global ocean warming: An acoustic measure? *J Phys Oceanogr*, 1989, 19: 1765–1778
- 13 Behringer D, Birdsall T, Brown M, et al. A demonstration of ocean acoustic tomography. *Nature*, 1982, 299: 121–125
- 14 Mikhalevsky P N, Baggeroer A B, Gavrilov A, et al. Continuous wave and M-sequence transmissions across the Arctic. *J Acoust Soc Am*, 1994, 96: 3235–3236
- 15 Munk W H. Acoustic thermometry of ocean climate. *J Acoust Soc Am*, 1996, 100: 2580
- 16 Luo J, Karjadi E A, Badiy M. High-frequency broadband acoustic current tomography in shallow water. *J Acoust Soc Am*, 2008, 123: 3914
- 17 Lin J, Kaneko A, Gohda N, et al. Accurate imaging and prediction of Kanmon Strait tidal current structures by the coastal acoustic tomography data. *Geophys Res Lett*, 2005, 32: L14607
- 18 Taniguchi N, Kaneko A, Yuan Y, et al. Long-term acoustic tomography measurement of ocean currents at the northern part of the Luzon Strait. *Geophys Res Lett*, 2010, 37: L07601
- 19 Taniguchi N, Huang C F, Kaneko A, et al. Measuring the Kuroshio current with ocean acoustic tomography. *J Acoust Soc Am*, 2013, 134: 3272–3281
- 20 Zheng H, Gohda N, Noguchi H, et al. Reciprocal sound transmission experiment for current measurement in the Seto Inland Sea, Japan. *J Oceanogr*, 1997, 53: 117–127
- 21 Kaneko A, Syamsudin F, Adityawarman Y, et al. Recent progress in coastal acoustic tomography. *J Acoust Soc Am*, 2016, 140: 3135–3136
- 22 Zhu X H, Kaneko A, Wu Q, et al. Mapping tidal current structures in Zhaitouyang Bay, China, using coastal acoustic tomography. *IEEE J Ocean Eng*, 2013, 38: 285–296
- 23 Zhao H F, Wang F Y, Zhu X H, et al. Ocean acoustic tomography: Current progress and future prospect (in Chinese). *J Ocean Technol*, 2015, 34: 69–74 [赵航芳, 汪非易, 朱小华, 等. 海洋声学层析研究现状与展望. 海洋技术学报, 2015, 34: 69–74]
- 24 Dong M H, Zhang C Z, Zhu X H, et al. Research progress of costal acoustic tomography for current measurement (in Chinese). *J Ocean Technol*, 2015, 34: 112–119 [董孟洪, 张传正, 朱小华, 等. 沿海流场声学层析研究进展. 海洋技术学报, 2015, 34: 112–119]
- 25 He L, Li Z L, Zhang R H, et al. Empirical orthogonal function representation and matching field of sound velocity profile in East China Sea (in Chinese). *Prog Nat Sci*, 2006, 16: 351–355 [何利, 李整林, 张仁和, 等. 东中国海声速剖面的经验正交函数表示与匹配场反演. 自然科学进展. 2006, 16: 351–355]
- 26 Liao G H, Zhu X H, Yang C H, et al. Numerical simulation study on inversion of two dimensional flow field using acoustic ray travel time (in Chinese). *Acta Oceanol Sin*, 2009, 31: 8–16 [廖光洪, 朱小华, 杨成浩, 等. 基于声传播时间的二维流场反演数值仿真研究. 海洋学报, 2009, 31: 8–16]
- 27 Li J L, Xu W, Jin L L, et al. Study of acoustic tomography based on data assimilation for shallow water environments (in Chinese). *Acta Acust*, 2012, 37: 10–17 [李建龙, 徐文, 金丽玲, 等. 浅海环境下数据同化声学层析方法研究. 声学学报, 2012, 37: 10–17]
- 28 Liao G H, Zhu X H, Lin J, et al. Observation technology and methods of ocean acoustic tomography (in Chinese). *Acta Oceanol Sin*, 2010, 32: 14–22 [廖光洪, 朱小华, 林巨, 等. 海洋声学层析观测技术和方法. 海洋学报, 2010, 32: 14–22]
- 29 Kawanisi K, Razaz M, Kaneko A, et al. Long-term measurement of stream flow and salinity in a tidal river by the use of the fluvial acoustic tomography system. *J Hydrol*, 2010, 380: 74–81
- 30 Kawanishi K, Kaneko A, Nigo S, et al. New acoustic system for continuous measurement of river discharge and water temperature. *Water Sci Eng*, 2010, 3: 47–55
- 31 Zhao Z, Zhang Y, Yang W, et al. High frequency ocean acoustic tomography observation at coastal estuary areas. *AIP Conf Proc*, 2012, 1495: 360
- 32 Yu X, Zhuang X, Li Y, et al. Real-time observation of range-averaged temperature by high-frequency underwater acoustic thermometry. *IEEE Access*, 2019, 7: 17975–17980
- 33 Yu X, Zhang Y. Ray chaos in an architectural acoustic semi-stadium system. *Chaos*, 2013, 23: 013107
- 34 Guo Y J, Lin S, Zhang Y, et al. Acoustic study on real-time monitoring of hydrologic parameters in estuaries (in Chinese). *J Xiamen Univ (Nat Sci)*, 2016, 55: 876–880 [郭宜君, 林松, 张宇, 等. 河口温流参数的声学实时监测研究. 厦门大学学报(自然科学版), 2016, 55: 876–880]

- 35 Adityawarman Y, Kaneko A, Nakano K, et al. Reciprocal sound transmission measurement of mean current and temperature variations in the central part (Aki-nada) of the Seto Inland Sea, Japan. *J Oceanogr*, 2011, 67: 173–182
- 36 Yang S L, Lin L, Hu Z Y. Change of flow characteristics at Jiulongjiang Estuary under different runoff (in Chinese). *Water Res Power*, 2017, 35: 52–57 [杨首龙, 林琳, 胡朝阳. 剧烈变化的径流对九龙江河口流动特性的影响. *水电能源科学*, 2017, 35: 52–57]

Study of high-frequency acoustic current tomography

YU XiaoJian^{1*}, LIN Song², ZHUANG XiaoBing², Guo YiJun² & LI YanLong³

¹ School of Biological Science and Biotechnology, Minnan Normal University, Zhangzhou 363000, China;

² Key Laboratory of Underwater Acoustic Communication and Marine Information Technology of the Ministry of Education, College of Ocean and Earth Sciences, Xiamen University, Xiamen 361005, China;

³ Department of Architecture, Xiamen University, Xiamen 361005, China

The sea-land interface is the most concentrated region of human marine development activities, and online monitoring of river current is very important for material flux and ecosystem evolution. In this study, the high-frequency acoustic current tomography of sea-land interface was studied. Based on the principle of acoustic reciprocity, the acoustic inversion algorithm of current was investigated. The experiment was carried out on the Jiulongjiang sea-land interface in Zhangzhou. The high-frequency transducer, with a center frequency of 60 kHz and bandwidth of 40–80 kHz, was used. According to the sound speed profile and underwater topographic survey, ray acoustic simulation was performed to reveal high-frequency sound propagation. The experimental results showed that the acoustic signal has high-signal amplitude and peak value of cross-correlation, which can be used to reconstruct the current of the river. Real-time monitoring of the river current during the typhoon “haibeisi” was achieved. The results showed that high-frequency acoustic tomography can be applied to the study of hydrodynamics of sea-land interface, hydrological measurement, and monitoring of extreme events, such as flood peak and heavy rainfall.

acoustic tomography, sea-land interface, current monitoring

PACS: 43.30.Wi, 43.30.Pc, 43.60.Cg, 43.60.Pt

doi: [10.1360/SSPMA-2020-0100](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2020-0100)