

【引用格式】刘晓健, 崔乃刚, 刘雪峰, 等. 基于海洋环境噪声水下探测研究进展[J]. 数字海洋与水下攻防, 2022, 5(6): 518-523.

# 基于海洋环境噪声水下探测研究进展

刘晓健<sup>1</sup>, 崔乃刚<sup>2</sup>, 刘雪峰<sup>3</sup>, 凡友华<sup>4,\*</sup>

(1. 天津城建大学 土木工程学院, 天津 300384; 2. 哈尔滨工业大学 航天学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 3. 中国民航大学 航空工程学院, 天津 300300; 4. 哈尔滨工业大学(深圳)理学院, 广东 深圳 518055)

**摘要** 由风、雨、舰船、海洋生物以及工业等因素形成的海洋环境噪声, 是海洋中永恒存在的声场, 包含频段丰富。无论是在水下目标的主动探测还是被动探测过程中, 海洋环境噪声都被认为是水声信道中的干扰因素。但海洋环境噪声包含诸多水体、海面、海底和海洋生物等信息, 可以通过反演获取海水、海底等各种信息。概述了国内外基于海洋环境噪声声成像的发展现状, 并预测了该领域技术发展趋势。基于海洋环境噪声进行的水下目标探测, 在探测开发海洋资源、维护国家主权和国家海洋环境安全等方面具有重要意义。

**关键词** 海洋环境噪声; 水下探测; 声成像

**中图分类号** TB566:P733.23

**文献标识码** A

**文章编号** 2096-5753(2022)06-0518-06

**DOI** 10.19838/j.issn.2096-5753.2022.06.006

## Research Progress of Underwater Detection Based on Ocean Ambient Noise

LIU Xiaojian<sup>1</sup>, CUI Naigang<sup>2</sup>, LIU Xuefeng<sup>3</sup>, FAN Youhua<sup>4,\*</sup>

(1. School of Civil Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China; 2. School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 3. School of Aviation Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China; 4. School of Science, Harbin Institute of Technology (Shenzhen), Shenzhen 518055, China)

**Abstract** The ocean ambient noise caused by wind, rain, ships, halobios and industries is an eternal sound field in the ocean, which contains rich frequency bands. Whether in the process of active or passive detection of underwater targets, the ocean ambient noise is considered as the interference factors in the underwater acoustic channel. However, the ocean ambient noise contains a lot of information of water body, sea surface, seabed, halobios, etc., which can be used to obtain information of the seawater, seabed, etc. by inversion. In this paper, the development status of acoustic imaging based on ocean ambient noise at home and abroad is summarized, and the technical development trend in this field is predicted. Underwater target detection based on ocean ambient noise has great significance in detecting and developing ocean resources, and safeguarding national sovereignty and national marine environmental security.

**Key words** ocean ambient noise; underwater detection; acoustic imaging

## 0 引言

海洋中充斥着由风、雨、舰船、海洋生物以及

工业等因素形成的海洋环境噪声<sup>[1]</sup>。处在海洋中的每个物体周围都有噪声, 在用声呐探测水下物体的过程中, 无论是主动探测还是被动探测, 都会受到

收稿日期: 2022-06-06

作者简介: 刘晓健(1981-), 女, 博士, 讲师, 主要从事材料隔声性能研究。

\*通信作者: 凡友华(1975-), 男, 博士, 教授, 主要从事振动与波动领域研究。

基金项目: 国家自然科学基金“瑞雷波多模式耦合机理及其勘探应用研究”(40604012)。

海洋环境噪声的干扰。但在海洋环境噪声中也包含有各种有用信息——处于噪声场中的物体的几何结构大小、空间位置及物理材料,对这些信息进行分析可以获取关于海水、海底的详细情况<sup>[2-3]</sup>。目前国内外关于海洋环境噪声特性研究主要包括以下几个方面:海洋环境噪声获取技术、建模、模型实验校验以及特性表征方法等<sup>[1]</sup>。水下目标探测的被动探测方式,探测系统本身不发射信号,不易被察觉,具有更强的隐蔽性。基于海洋环境噪声的水下目标探测越来越受到各国学者的重视。在介绍海洋环境噪声的基础上,概述了国内外基于海洋环境噪声声成像的发展现状,论述了海洋环境噪声成像技术发展中依然存在的问题及未来发展趋势。

## 1 海洋环境噪声

### 1.1 分类

海水中的环境噪声是许多特性不同的噪声源辐射噪声的总和<sup>[4]</sup>。海洋环境噪声按频率范围、声源、产生方式可以进行以下分类,如表1所示。

表1 海洋环境噪声分类<sup>[5-7]</sup>

Table 1 Classification of ocean ambient noise

划分依据	分类	噪声源
频率范围	极低频噪声	深海环境极低频噪声/大气声源/浅海水下爆破施工
	超低频、甚低频噪声	低频超电磁噪声/船舶航行和地震勘探/中低频声呐、鱼雷/建设及海边工业活动/海面粗糙度和海面降水/大气声源、地质声源和冰海效应/海洋生物发声
	高频噪声	高频声呐/热噪声/海洋生物发声
声源	深海环境噪声源	潮汐、波浪的压力作用产生的噪声/地震扰动噪声/海洋湍流噪声/舰船噪声/水面波浪噪声/海水热噪声
	浅海环境噪声源	行船及工业噪声/风成噪声/生物噪声

按声源的发声频率的不同进行分类,可以分为:极低频噪声、超低频及甚低频噪声、高频噪声<sup>[5]</sup>。

深海环境的噪声源一般有:潮汐和波浪的压力作用、地震扰动、海洋湍流、船舶噪声、水面波浪和热噪声<sup>[6]</sup>,浅海环境噪声源有:行船及工业噪声、风成噪声、生物噪声<sup>[7]</sup>。

### 1.2 海洋环境噪声获取

海洋噪声测量是对特定的海洋环境在规定的频率范围内进行噪声测量,可以采用浮标、潜标和沉底等手段,短期监测可以使用船只拖拽测量装置进行,长期监测则使用固定点位或者分布式光纤声波传感器<sup>[8]</sup>。美国海军利用声监测系统对海洋环境噪声测量进行长期测量。印度的 RAMJI 等人利用浮标系统测量分析浅海环境噪声<sup>[9]</sup>。国内的学者在海洋环境噪声获取方面也进行了相关的研究。张毅等设计开发了一种超低功耗海洋环境噪声监测系统<sup>[10]</sup>。姚壮等利用带宽为 20 Hz ~ 100 kHz 的水听器测量系统对大连市周边近岸海域 5 个典型站点的水下噪声进行了测量,获取各站点海洋环境噪声数据<sup>[11]</sup>。

### 1.3 海洋环境噪声模型

在噪声源研究的基础上结合波导声传播特性发展起来的海洋环境噪声模型包括噪声源模型和声传播模型<sup>[1]</sup>。

风关噪声是各海域普遍存在的频率从几百赫兹到几万赫兹的主要海洋环境噪声源,风关噪声模型通常采取静态噪声源模型或动态噪声源统计模型<sup>[12]</sup>。远处航船噪声是产生低频海洋环境噪声的主要噪声源,舰船辐射噪声源可以分为:机械噪声、螺旋桨噪声和水动力噪声<sup>[7]</sup>。吴国清、陶笃纯、蒋国健等对船舶水下辐射噪声信号建模进行了大量的研究工作<sup>[13-15]</sup>。在舰船水下辐射噪声信号建模的基础上,孙军平等用准周期随机声脉冲序列模型仿真进行了仿真研究<sup>[16]</sup>。MA 等人研究了小阵雨和一般降水过程中的水下噪声<sup>[17]</sup>。

20 世纪 60 年代,CRON 和 SHERMAN 开始环境噪声理论模型研究,提出了适合深海情况传播模型较为简单的 C/S 模型<sup>[18]</sup>。LIGGETT 和 JACOBSON 采用波动理论研究了噪声在半无限深海水中的传播<sup>[19-20]</sup>。CHAPMAN 在考虑了海底反射的影响的基础上扩展了 C/S 模型<sup>[21]</sup>。PLAISANT 采用射线理论描述了海洋表面噪声源层到接收水听器的声传播过程<sup>[22]</sup>。KUPERMAN 和 INGENITO 利用波动理论提出 K/I 模型<sup>[23]</sup>。CAREY 等将适合远场条件的抛物方程传播模型与海面噪声源耦合起来,

计算了水平非均匀海洋环境噪声场的垂直分布<sup>[24]</sup>。BUCKINGHAM 针对等声速剖面、浅海“低损失”声道中传播的特殊情况,采用简正波法得到噪声场的垂直相关系数和阵增益<sup>[25]</sup>。HARRISON 对声传播作射线处理的基础上提出 CANARY 模型<sup>[26]</sup>。国内学者张仁和等人发展了新的简正波方法<sup>[27-28]</sup>。

## 2 基于海洋环境噪声的水下目标探测

水下目标检测、识别和跟踪是热点研究领域,涉及范围包括:濒危水生物的跟踪与保护、鱼群定位、分类与跟踪、水环境测深与建模、海床建模与绘图、打捞与救助、海底管道探测、海底目标定位与识别,以及军事上水雷、潜艇、蛙人、水下航行器等水下目标物的探测、识别与跟踪等<sup>[29]</sup>。水下目标探测对于维护国家主权、保障国家海洋环境安全、促进海洋探索与开发至关重要<sup>[30]</sup>。

水下声学测量具有距离远、效率高的特点。应用声呐检测水下目标是目前最常用的检测手段,声呐设备包括:前视声呐、侧扫声呐和合成孔径声呐<sup>[29]</sup>。水下目标监视系统,通过接收目标的辐射噪声或散射声波对目标进行分类、识别和定位,长基线低频被动声呐可以监视诸如潜艇之类的大目标,在航行过程中产生较大的辐射噪声。声波在水下可以远距离传播,目标识别系统通过声呐被动接收目标的辐射噪声对目标进行特征分析<sup>[31]</sup>,声矢量传感器可用于水下弱目标识别与检测<sup>[32]</sup>。

在传统的声呐系统中,海洋环境噪声掩盖了目标声音的特征,从而阻碍了目标信号的检测。但与此同时,海洋环境噪声中也携带了丰富的海洋环境信息,利用海洋环境噪声可以实现水下目标声成像。

FLATTE'S 和 MUNK 等在《简式防务周刊》首次探索了将海洋环境噪声作为声学“照明”源形成水下物体图像的可能性,海洋环境噪声在水下目标存在时发生改变来判断目标的存在<sup>[33]</sup>。20世纪80年代,BUCKINGHAM 提出了声学照明(acoustic daylight)的想法,用海洋噪声充当“光源”,将噪声“照射”成像比拟大气中日光照相,对海洋中的目标进行探测和成像<sup>[34-35]</sup>。BUCKINGHAM 针对海

洋环境噪声,进行水下目标散射声场的计算<sup>[36]</sup>。POTTER 将海洋环境噪声场用作照明装置,建立静止物体被动成像理论,并给出仿真的图像<sup>[37]</sup>。日本学者 KAZUYOSHI 等采用基于时域有限差分分析的水声透镜系统进行环境噪声成像研究<sup>[38-40]</sup>。国内一些学者也对基于海洋环境噪声目标探测进行了研究<sup>[41-50]</sup>。曾娟等提出一种利用环境噪声作为照明声源的目标探测方法,在理论上给出了圆形压释目标被环境噪声照射的噪声场<sup>[41]</sup>。林建恒等采用散射理论方法研究了水下目标对于海洋环境噪声的散射扰动特性<sup>[42]</sup>。蒋国健等提出了通过声阵聚焦接收、增加积分时间以及频域处置等方式增强水下目标声学可见度<sup>[43]</sup>。李小雷等基于环境噪声互相关和环境噪声自相关理论,利用海浪噪声进行安静目标探测<sup>[44-45]</sup>。孟昭然研究了雨致噪声源水下目标类光声成像<sup>[50]</sup>。

在理论研究的基础上,各国学者进行了大量的实验研究。1991年在南加州的斯克里普斯码头BUCKINGHAM 等进行了第1次声照明实验,用于聚焦的声学探测器是压电水听器位于焦点处且直径为1.2 m的抛物线盘,在12 m的范围内,海洋环境噪声场中的矩形目标存在与否可以进行探测,实验证实了在5 kHz~50 kHz的频率范围内确实可见仅由海洋环境噪声照亮的物体,目标可以改变噪声场<sup>[35]</sup>。1994年,美国的斯克里普斯海洋学研究所成功研制了世界第1个环境噪声成像系统ADONIS (Acoustic Daylight Ocean Noise Imaging System),系统包含直径3 m的球面反射器,130个水听器呈椭圆形阵列布置在焦面处,工作频率在8 kHz~80 kHz<sup>[51-52]</sup>。该系统于1994年8月(首次)和1995年10-11月被使用在南加州进行的环境噪声成像实验,实验中的成像目标包括:面积为1 m×1 m的方形平面板,直径0.5 m、高0.76 m、壁厚0.5 cm的装有湿沙、海水和复合泡沫塑料的圆柱形聚乙烯桶,以及直径0.7 cm壁厚1.5 cm的中空钛球,目标范围在20~40 m之间,在主要由鼓虾产生的海洋环境噪声场中,ADONIS系统成功地创建了目标空间的彩色图像<sup>[53]</sup>。虽然从ADONIS系统中选择的数据成功地用于40 m范围内水下物

体成像,但是其它大部分数据没有产生可识别的图像。这是由于环境噪声统计上的波动,有时有利于产生声学照明,而其他时间不利于产生声学照明。由于 ADONIS 系统的局限性——接收波束只记录能量估计而没有相位信息。1998 年新加坡国立大学声学研究实验室建立了第 2 代的环境噪声成像系统 ROMANIS (Remotely Operated Mobile Ambient Noise Imaging System),该系统由 508 个压力传感器形成一个直径约为 1.3 m 的二维平面阵列,工作频率 25 kHz~85 kHz。2003 年 2 月首次在海上部署该系统,检查系统在真实海水环境中的功能,并对 70 m 范围内的水下物体噪声成像,同时研究了部署位置的高频环境噪声特性<sup>[54]</sup>。该声学实验室的研究人员应用 ROMANIS 系统在新加坡进行现场实验,在采集环境噪声的声压记录的基础上进行了一系列理论和实验研究<sup>[55-60]</sup>。在 2009 年,为了更加高效可靠操作 ROMANIS,该系统的电子器件和软件进行了翻新<sup>[61]</sup>。澳大利亚航空与海洋研究室研制了 DSTO 成像阵列,含有 256 个水听器单元的 2 m×2 m 孔径随机稀疏相控阵,该系统由 4 个含 64 个单元 1 m×1 m 相同的子阵模块化组成<sup>[62]</sup>。日本国防学院的 KZAYOSHI MORI 等基于非球面镜头研制了环境噪声成像系统即 ANI 系统<sup>[63]</sup>,分别于 2010 年 11 月、2014 年 11 月、2016 年 11 月在内浦湾进行了 3 次海上实验<sup>[40, 64-67]</sup>。2010 年的第 1 次海上实验采用的是第 1 个 ANI 原型系统,该系统通过安装一维水听器阵列于透镜的像面以测量其方向分辨率,在将频带高于 60 kHz 归类于目标回波的情况下,证实了存在目标物体的目标方向上的功率谱密度水平要大于不存在目标物体的情况<sup>[63]</sup>。在海洋背景噪声源主要由鼓虾产生的情况下,成功地探测到了水下的无声目标<sup>[64]</sup>。为了评估第 2 个原型系统,在 2014 年进行了第 2 次海上实验,数据分析结果表明,通过环境噪声将外形为平板状和球体的无声目标的图像成功呈现<sup>[65-66]</sup>。2016 年的第 3 次海洋实验,通过环境噪声成像系统成功地探测出频率响应峰值为 80 kHz 和 160 kHz 的 2 个目标<sup>[67]</sup>。不同环境噪声成像系统的比较见表 2。

表 2 环境噪声成像系统<sup>[59]</sup>  
Table 2 Ambient noise imaging system

系统参数	美国 ADONIS	新加坡 ROMANIS	澳大利亚 DSTO	日本 ANI 系统
孔径形状	圆形	圆形	/	圆形
孔径尺寸/m	3	1.44	2×2	1
波束形成方式	球面反射器	相控阵	相控阵	折射透镜
带宽/kHz	8~80	25~85	10~150	10~200
传感器数量	130	508	256	128
传感器类型	全方位	定向	全方位	全方位
近似重量/kg	1 000	500	1 000	250
建造	单一系统	高度模块化	模块化	单一系统
实时成像	是	是	否	是

### 3 结束语

海洋环境噪声是海洋中永恒存在的声场。相较于国外的研究,我国在利用海洋环境噪声进行水下探测的研究还处于初步阶段。未来可以针对水下物体对海洋环境噪声频散信息的影响,进一步发展基于低频背景噪声的水下目标探测方法,提高探测距离和信噪比。

### 参考文献

- [1] 郭新毅,李凡,铁广朋,等. 海洋环境噪声研究发展概述及应用前景[J]. 物理, 2014, 43(11): 723-731.
- [2] 李赫,郭新毅,马力. 利用海洋环境噪声空间特性估计浅海海底分层结构及地声参数[J]. 物理学报, 2019, 68(21): 154-165.
- [3] TRAER J, GERSTOFT P, HODGKISS W S. Ocean bottom profiling with ambient noise: a model for the passive fathometer[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2011, 129(4): 1825-1836.
- [4] 黄益旺. 海洋环境噪声空间相关性建模综述[J]. 应用声学, 2019, 38(4): 729-733.
- [5] 张国胜,顾晓晓,邢彬彬,等. 海洋环境噪声的分类及其对海洋动物的影响[J]. 大连海洋大学学报, 2012, 27(1): 89-94.
- [6] 马大猷,沈嵘. 声学手册[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [7] URICK R J. 水声原理[M]. 3 版. 洪申,译. 哈尔滨: 哈尔滨船舶工程学院出版社, 1990.
- [8] 宛立君,吴梦实,严爱博. 基于分布式光纤声波传感的海洋环境噪声监测技术[J]. 声学与电子工程, 2021, 142: 11-14.
- [9] RAMJI S, RAMAKRISHNAN S, LATHA G. Analysis of short term temporal fluctuations in noise power spectrum of shallow water ambient noise[C]//

- Symposium on Underwater Technology and Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies. Tokyo: IEEE, 2007.
- [10] 张毅, 孙思萍, 齐尔麦, 等. 低功耗、大存储量海洋环境噪声监测系统的研究[J]. 海洋技术, 2009, 28 (1): 41-45.
- [11] 姚壮, 张飞成, 姚智慧, 等. 大连周边近岸典型海域海洋环境噪声的测量分析[J]. 大连海洋大学学报, 2015, 30 (5): 553-557.
- [12] 林建恒, 衣雪娟, 陈鹏, 等. 风关海洋环境噪声源模型[C]// 中国声学学会全国声学学术会议. 厦门: 中国声学学会, 2006.
- [13] 吴国清. 背景噪声中检测舰船辐射噪声的周期调制的性能估算[J]. 声学学报, 1982, 7 (4): 222-232.
- [14] 陶笃纯. 舰船噪声节奏的研究 ( I ) ——数学模型及功率谱密度[J]. 声学学报, 1983, 8 (2): 65-76.
- [15] 蒋国健, 林建恒, 马杰, 等. 舰船螺旋桨空泡噪声的数理模型[J]. 声学学报, 1998, 23 (5): 401-408.
- [16] 孙军平, 杨军, 林建恒, 等. 船舶水下辐射噪声信号理论模型及仿真[J]. 物理学报, 2016, 65 (12): 301-400.
- [17] MA B B, NYSTUEN J A. Passive acoustic detection and measurement of rainfall at sea[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2005, 22 (8): 1225-1248.
- [18] CRON B F, SHERMAN C H. Spatial correlation function for various noise models[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1962, 34 (11): 1732-1736.
- [19] LIGGETT W S, JACOBSON M J. Covariance of surface-generated noise in a deep ocean[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1965, 38 (2): 303-312.
- [20] LIGGETT W S, JACOBSON M J. Noise covariance and vertical directivity in a deep ocean[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1966, 39 (2): 280-288.
- [21] CHAPMAN D M F. Surface-generated noise in shallow water: a model[J]. Proceedings of the Institute of Acoustics, 1988, 9: 1-11.
- [22] PLAISANT A. Spatial coherence of surface generated noise[C]// Proceeding of UDT. London: UDT, 1992.
- [23] KUPERMAN W A, INGENITO F. Spatial correlation of surface generated noise in a stratified ocean[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1980, 67 (6): 1988-1996.
- [24] CAREY W M, EVANS R B, DAVIS J A, et al. Deep-ocean vertical noise directionality[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1990, 15(4): 324-334.
- [25] BUCKINGHAM M J. A theoretical model of ambient noise in a low-loss shallow water channel[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1980, 67: 1186-1192.
- [26] HARRISON C H. Noise directionality for surface sources in range-dependent environments[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1997, 102 (5): 2655-2662.
- [27] WANG Q, ZHANG R H. Sound spatial correlations in shallow water[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1992, 92 (2): 932-938.[27]
- [28] 张仁和. 浅海声场的平滑平均理论、数值预报与海底参数反演[J]. 物理学进展, 1996, 16 (3): 932-938.
- [29] 郭戈, 王兴凯, 徐慧朴. 基于声呐图像的水下目标检测、识别与跟踪研究综述[J]. 控制与决策, 2018, 33 (5): 906-922.
- [30] 杨益新, 韩一娜, 赵瑞琴, 等. 海洋声学目标探测技术研究现状和发展趋势[J]. 水下无人系统学报, 2018, 26 (5): 369-386.
- [31] 张寅权, 张爽, 孙春健, 等. 水下目标监视系统发展综述[J]. 信息技术, 2019, 34 (1): 11-18.
- [32] 方尔正, 黄志浩, 桂晨阳. 水面水下目标识别技术的现状与挑战[J]. 国防科技工业, 2020 (7): 66-68.
- [33] FLATTE'S, MUNK W. Submarine detection: acoustic contrast versus acoustic glow, SR-85-108[R]. Virginia: MITRE Corporation, 1985.
- [34] BUCKINGHAM M J. Personal Communication to Dr. David Bradley[Z]. Washington DC: Naval Research Laboratory, 1987.
- [35] BUCKINGHAM M J, BERKHOUT B V, GLEGG S A L. Imaging the ocean with ambient noise[J]. Nature, 1992, 356: 327-329.
- [36] BUCKINGHAM M J. Theory of acoustic imaging in the ocean with ambient noise[J]. Journal of Computational Acoustics, 1993, 1: 117-140.
- [37] POTTER J R. Acoustic imaging using ambient noise: some theory and simulation results[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1994, 95 (1): 21-33.
- [38] MORI K, MIYAZAKI A, OGASAWARA H, et al. Numerical analysis of an underwater acoustic lens system for ambient noise imaging using finite difference time domain method[C]// OCEANS 2006-Asia Pacific. Singapore: IEEE, 2006.
- [39] MORI K, MIYAZAKI A, OGASAWARA H, et al. Finite difference time domain analysis of underwater acoustic lens system for ambient noise imaging[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2006, 5 (45): 4834-4841.
- [40] MORI K, OGASAWARA H, NAKAMURA T, et al. Extraction of target scatterings from received transients on target detection trial of ambient noise imaging with acoustic lens[J]. Japanese Journal of Applied Physics,

- 2012, 51 ( 7S ): 07GG10.
- [41] 曾娟, 陈耀明, 张小平. 利用环境噪声的目标探测方法[C]// 中国声学学会 2001 青年学术会议. 上海: 中国声学学会, 2001.
- [42] 林建恒, 王彦, 陈鹏, 等. 水下目标对幅度高斯相关海面环境噪声场扰动特性的研究[J]. 声学学报, 2009, 34 ( 1 ): 39-46.
- [43] 蒋国健, 林建恒, 衣雪娟, 等. 水下目标声学可见度增强途径[J]. 声学技术, 2012, 31 ( 4 ): 248-252.
- [44] 李小雷, 迟静, 高大治, 等. 利用海浪噪声“减背景自相关”方法实现散射体探测[J]. 声学技术, 2017, 36 ( 5 ): 157-158.
- [45] 李小雷, 高大治, 黎洁, 等. 利用环境噪声进行安静目标探测[J]. 应用声学, 2018, 37 ( 5 ): 636-644.
- [46] 蔡乐. 海洋环境噪声声学成像的仿真研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010.
- [47] 吴爽. 基于反射镜的水下声成像系统建模与仿真[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011.
- [48] 丁磊. 水下噪声成像实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
- [49] 王世安. 浅海波导中目标对海面噪声散射的建模与仿真[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011.
- [50] 孟昭然. 雨致噪声源水下目标类光声成像方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2015.
- [51] BUCKINGHAM M J, POTTER J R. Acoustic daylight imaging: vision in the ocean[J]. GSA Today, 1994, 4 ( 4 ): 97-102.
- [52] BUCKINGHAM M J, POTTER J R, EPIFANIO C L. Seeing underwater with background noise[J]. Scientific American, 1996, 274 ( 2 ): 86-90.
- [53] EPIFANIO C L, POTTER J R, DEANE G B, et al. Imaging in the ocean with ambient noise: the ORB experiments[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1999, 106 ( 6 ): 3211-3225.
- [54] VENUGOPALAN P, CHITRE M A, TAN E T, et al. Ambient noise imaging—first deployments of ROMANIS and preliminary data analysis[C]// OCEANS 2003. San Diego: IEEE/MTS, 2003.
- [55] VENUGOPALAN P, CHITRE M, KUSELAN S. Ambient noise imaging: experiments with ROMANIS, an ARL built underwater ANI camera[C]// 10<sup>th</sup> International Conference on Theoretical and Computational Acoustics. Taipei: MTS/IEEE, 2011.
- [56] CHITRE M, KUSELAN S, PALLAYIL V. Ambient noise imaging in warm shallow waters: robust statistical algorithm and range estimation[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2012, 132 ( 2 ): 838-847.
- [57] MIN T Y, CHITRE M. Localization of impulsive sources in the ocean using the method of images[C]// OCEANS. St. John's: MTS/IEEE, 2014.
- [58] MIN T Y, CHITRE M, PALLAYIL V. Detecting the direction of arrival and time of arrival of impulsive transient signals[C]// OCEANS 2016. Monterey: MTS/IEEE, 2016.
- [59] PALLAYIL V, CHITRE M, KUSELAN S, et al. Development of a second-generation underwater acoustic ambient noise imaging camera[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2015, 41 ( 1 ): 175-189.
- [60] TOO Y M, CHITRE M, BARBASTATHIS G, et al. Localizing snapping shrimp noise using a small-aperture array[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2017, 44 ( 1 ): 207-219.
- [61] KUSELAN S, RAICHUR A, PALLAYIL V. Design and development of a Gigabit Ethernet based high-speed broadband data acquisition system for an underwater imaging array[C]// OCEANS. Seattle: MTS/IEEE, 2010.
- [62] READHEAD M L. Acoustic daylight-using ambient noise to see underwater[J]. Acoustic Australia, 2001, 29: 2-63.
- [63] MORI K, OGASAWARA H, NAKAMURA T, et al. Design and convergence performance analysis of aspherical acoustic lens applied to ambient noise imaging in actual ocean experiment[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2011, 50 ( 7S ): 07HG09.
- [64] MORI K, OGASAWARA H, NAKAMURA T, et al. Relationship between spatial distribution of noise sources and target scatterings observed in the 2010 sea trial of ambient noise imaging[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2013, 52 ( 7S ): 07HG02.
- [65] MORI K, OGASAWARA H, NAKAMURA T, et al. Preliminary data analysis of the 3<sup>rd</sup> sea trial for ambient noise imaging with acoustic lens[C]// 3<sup>rd</sup> Underwater Acoustics Conference & Exhibition. Crete: CCBS, 2015.
- [66] MORI K, OGASAWARA H, TSUCHIYA T, et al. Data analysis results of the second sea trial of ambient noise imaging with acoustic lens in 2014: two-dimensional target images affected by direction of field of view and spatial noise distribution[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2016, 55 ( 7S1 ): 07KG07.
- [67] MORI K, KAWAHARA H, OGASAWARA H, et al. Expression with red-green-blue additive color mixing for frequency-dependent targets in the third sea trial of ambient noise imaging with acoustic lens in 2016[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2018, 57 ( 7S1 ): 07LG05.

(责任编辑: 曹晓霖)