

# 基于多源信息融合的浅海超低频声源目标探测关键技术及实现

孙显彬<sup>1,2,3</sup>, 郑轶<sup>2</sup>, 于非<sup>3</sup>

(1. 山东省科学院海洋仪器仪表研究所, 山东 青岛 266001; 2. 青岛理工大学 机械工程学院, 山东 青岛 266033; 3. 中国科学院海洋研究所, 山东 青岛 266071)

**摘要:** 以多传感器信息融合理论为指导, 结合现代信息处理技术与数据驱动建模及科学计算技术, 研究浅海超低频声源目标激发共存地震波的复合声场中超低频声波传播特性和数据驱动建模的水下目标深度识别等关键技术, 并论证了技术实现方案及路径。结果表明: 以复合矢量水听器、地震波监测仪等多传感器信息融合理论为指导研究前海超低频声源目标可以克服传统声场建模存在的问题, 有助于浅海超低频声源目标探测及改善海洋水下声学监测手段。在提高声呐探测设备的测量准确度、精度方面具有重要的理论意义, 对周边海域为浅海的我国海防具有实战价值。

**关键词:** 多源信息融合; 浅海; 超低频; 目标探测

**中图分类号:** O427.1 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-3096(2019)01-0095-06

**DOI:** 10.11759/hyxx20180511001

近年来, 海洋声学研究的重点已经转移到浅海环境中来, 随着声呐技术的不断发展, 各国为了降低潜艇被声呐探测到的概率, 都大力开展了潜艇隐身技术的研究, 潜艇在高频段辐射噪声明显降低, 声呐工作频段正向低频/超低频移动。深入研究浅海超低频声源在复杂水下环境中的传播规律和传播特性, 正确的描述水下声场, 改善提高声呐设备性能, 是实现浅海超低频声源目标探测的理论基础, 进而实现声源目标方位和目标深度的准确估计, 是实现浅海超低频声源目标探测的核心和关键。本文在分析超低频声场研究现状存在主要问题的基础上, 提出一种基于多源信息融合的浅海超低频声源目标探测关键技术及实现的技术方案。

## 1 浅海超低频声场研究现状

### 1.1 现有的理论基础

声波在海洋中的传播满足最基本的波动方程, 但是由于海洋环境复杂多变, 海洋中声场分布极其复杂。研究学者为研究海洋环境与声场分布之间的关系, 考虑二者之间的主要影响因素, 按照不同应用场景, 简化忽略次要因素, 提出了不同的海洋声场模型。根据假设和近似的不同, 海洋标量声传播模型主要分为射线模型、简正波模型、多途扩展模型、抛物方程以及一些混合算法模型<sup>[1]</sup>, 表1为不同算法模型的适用范围<sup>[2]</sup>。从表1可以看出, 简正波模型与

抛物方程模型可用于浅海低频声场建模。

### 1.2 现有研究存在的问题

浅海海底特性为超低频声传播研究带来了很大的困难。具体表现在: ①海底的成分更加复杂, 海底通常是分层的, 海底的密度和声速(压缩波波速和剪切波波速)一般随深度渐变或突然变化; ②超低频声波能够通过沉积层传播, 也能被基岩反射回水中, 也能被沉积层中大的声速梯度折回水中。③超低频声波具有很强的穿透性, 可穿透沉积层同时在海底会激发地震波。

目前通用的声传播模型以及近年来公开发表的声场建模方法及模型在预报分析传播损失或者能量幅度等方面的性能基本可靠, 但在超低频矢量信号特征变化仿真方面欠缺较大, 仿真结果均不能与实际海试中超低频矢量信号特征变化现象相吻合。在前期多个海域多次试验中研究发现, 声源在不同深度运动时, 其信号特征变化明显不同, 矢量信号特征变化与声源深度存在某种程度的内在关联, 十分必要开展进一步研究。

收稿日期: 2018-05-11; 修回日期: 2018-07-08

基金项目: 山东省自主创新重大关键技术项目(2014GJJS0101); 山东省自然科学基金项目(ZR2013DM014)

[Foundation: Major Key Technology Projects for Independent Innovation in Shandong Province, No. 2014GJJS0101; Shandong Provincial Natural Science Foundation Project, No.ZR2013DM014]

作者简介: 孙显彬(1978-), 男, 山东单县人, 高级工程师, 博士后, 主要从事浅海声学方面的研究, 电话: 0532-85071780, E-mail: robin\_sun@qut.edu.cn

表 1 水声传播模型的适用范围

Tab. 1 Scope of application of hydroacoustic propagation model

模型类型	应用							
	浅海				深海			
	低频		高频		低频		高频	
	RI	RD	RI	RD	RI	RD	RI	RD
简正波	2	1	2	1	2	1	1	0
多路径展开	0	0	1	0	1	0	2	0
快速场	2	0	2	0	2	0	2	0
射线理论	0	0	1	2	1	1	2	2
抛物方程	1	2	0	0	1	2	1	1

注: 低频表示<500 Hz; 高频表示>500 Hz; RI 表示传输距离与环境无关; RD 表示传输距离与环境有关; 0 表示既不物理适用又不计算可行; 1 表示有精度或者运行速度上限制; 2 表示既物理适用又计算可行。

### 1.3 存在问题的可能原因

目前浅海超低频声波传播特性与海试数据中发现的传播特性有很大偏差, 根本原因在于没有掌握浅海超低频声波激发地震波共存的复合声场下的传播特性, 无法建立准确的声场模型。主要原因可能为: ①超低频声波在海底会激发地震波且普遍存在。因此, 超低频矢量声场建模恰恰不能忽略地震波的影响。目前通用的声传播模型以及近年来公开发表的声场建模方法及模型大多数未考虑地震波声场的存在。②目前成熟的超低频矢量信号采集系统较少, 对浅海超频信号的检测只能借助于多传感器同步采集, 一方面采用哪些传感器组成网络缺乏理论依据, 造成大量信息冗余, 另一方面, 由于浅海环境试验受干扰因素太多, 超低频目标信号往往湮没在庞大的背景噪声中。③多种传感器的使用导致多源异构数据量急剧增加, 但由于缺乏数据集成和信息融合的理论与方法, 采集数据远未能发挥应有价值。④水下目标识别研究大多数集中在距离探测和判断, 以多传感器信息融合为指导的超低频矢量声场传播特性和传播规律研究同时兼顾水下微弱信号获取与分离技术、水下目标深度区分研究极少。总之, 此类技术较为敏感, 一般为各国专有亦无从借鉴, 加之我国在此方面的研究基础比较薄弱, 因此, 对这个亟待解决又有很大挑战性课题的深入研究, 既是理论发展的要求也是实践的需求。

## 2 多源信息融合的浅海超低频声源目标探测研究

### 2.1 浅海超低频声传播的多源信息融合思想

浅海声学研究表明: 矢量水听器可以检测复合

声场中质点的振速(矢量)和声压(标量), 振动测量仪可以检测复合声场中质点的加速度信息, 地震波检测仪可以检测地震波的传播特性和规律。数据融合技术是指同一个观测系统中为提高系统的观测范围、增强系统的可信度、提高分辨能力, 基于对矢量水听器、振动测量仪、地震波检测仪等多源信息的相关性、互补性和相容性分析, 对多个传感器获取不同层次、不同特征的数据和信息通过融合算法进行关联、相关和综合, 借助一定的融合和判定规则得以实现对浅海超低频声波的传播特性研究对象的精度改善或者更准确的状态识别。

### 2.2 主要研究内容

1) 研究浅海分层弹性海底模型中超低频声波激发地震波的产生机理。研究发现分层弹性海底环境中水下声源传播时会激发地震波。因此, 超低频声传播特性其实受到超低频声场和地震波声场共存的复合场影响。研究复合声场中地震波的产生机理和超低频声波的传播特性, 才能从根本上解决超低频声波传播特性与海试数据中发现的传播特性吻合度较差的问题。

2) 研究复杂水下环境中多种传感器同步获取超低频微弱声源信号的试验方案和技术方法。信息融合的核心内容包括数据关联和数据对准, 即多种传感器采集的数据必须是同一时刻对同一声源的描述。数据对准包括基准时刻的同步性和采样频率的一致性。超低频声场感知数据蕴含着各种海洋环境和过程的未知机理以及不同海洋环境和过程之间相互作用的复杂关系。受台风、洋流等因素影响, 海洋环境复杂、气象多变, 对多传感器同步获取复杂水下环境中声源信息提出了更高的要求和挑战, 建立适

用于微弱信号多传感器同步采集的试验方案,是整个项目的基础和关键一环。

3) 研究超低频声源激发地震波声场共存的复合声场中微弱信号的分离、处理、利用等技术手段。多传感器获取复杂水下环境中超低频微弱声源信号后,必然需要多层次、多方面、多级别的信息处理,研究表明采用不同的数据处理方法处理同组海试数据得到的结果差别较大。首先对前期积累的海上试验数据,综合对比当前成熟的包括时频分析、信号滤波、增强、变换、参数估计、识别、分类等几乎所有常规信息理论与信号分析处理方法,筛选出适用于实际海洋环境的微弱矢量信号分析处理方法,为后续信息融合提供证据体。

4) 以多传感器信息融合为技术手段,研究浅海超低频声源激发地震波共存的复合声场中超低频声波的传播特性。将在研究内容①的基础上,采用②中研究试验方案和技术手段,通过对矢量水听器、振动测量仪、地震波检测仪异类传感器能获得观察对象的多类交叉互补信息,综合各类信息特征、探求最优融合算法、实现不确定性推理,掌握浅海超低频声源激发地震波影响的复合声场中超低频声传播特性。

5) 研究超低频声场和地震波声场共存的复合声场下数据驱动的目标深度区分模型构建方法。目前,水下目标识别研究大多数集中在距离探测和判断,而对深度区分研究极少,研究发现,不同深度发射时,其信号特征变化出现明显不同,这一现象在多个海域多次试验中得到复现,为利用这一变化特征对声源深度进行区分提供了可能。避开复合声场中物理背景的分析 and 数学技巧的运用,引入大数据处理和科学计算思想构建数据驱动的目标深度区分模型。

### 2.3 多源信息融合的浅海超低频声源目标探测技术特点

多传感器信息获取与融合为技术手段研究分层弹性海底环境模型中超低频声波激发地震波的产生机理,有助于准确掌握考虑超低频声源激发地震波影响的超低频声波传播特性,构建数据驱动的目标深度区分模型,具有以下方面的特征:①采用多传感器数据集成和融合理论作为超低频声波、地震波的信息获取、处理及利用的理论依据和关键技术。②掌握超低频声场和地震波声场共存的复合声场下超低频

声传播特性,与实际海试数据吻合程度高。③建立超低频声场和地震波声场共存的复合声场下数据驱动的目标深度区分模型,充分挖掘试验数据的价值,建模更直接。

## 3 多源信息融合的浅海超低频声源目标探测技术实现方案

浅海超低频声波在其激发地震波共存的复合声场中的传播特性,多种传感器获取浅海超低频微弱声源信号的试验方案,浅海微弱信号的分离、处理、利用等技术手段,多传感器信息融合方法和算法实现,水下目标深度区分模型的构建等均是超低频声源目标探测的关键技术,也是水声信号处理、被动测距、目标识别以及海洋环境监测的理论和实践基础。

### 3.1 方案涉及的主要技术

①水下复杂环境中的多传感器多参数感知及同步获取技术;②微弱信号的分离、滤波、降噪、特征提取等数据处理技术;③多传感器信息融合技术;④数据驱动建模与大数据处理及科学计算技术。

### 3.2 研究路径

本文按照研究内容执行两条技术路线分步骤分层次展开研究。第一条主线,首先以分层弹性海底的现有试验数据,进行数据分析、数据挖掘,结合地震波理论研究浅海超低频声波激发地震波的产生机理、对超低频声波的影响机制,进而优化整合以往的海试方案,设计适合水下复杂环境的多传感器多参数感知及同步获取试验方案,实现水下多传感器信息同步获取,接着研究微弱信号降噪,分离、滤波、降维、特征提取等技术手段,然后结合多传感器数据融合的方法,建立融合模型和算法实现,得到多传感器数据对超低频声波在复合声场中的传播特性的精确描述,为浅海超低频声矢量建模提供理论依据。第二条主线,主要是海上试验获取实验数据,包括矢量水听器和振动测量仪获取不同深度下复合声场信息和地震波检测仪获取地震波声场信息,借助第一条主线中的微弱信号降噪,分离、滤波、降维、特征提取等技术,结合数据驱动的复杂系统建模技术,构建水下目标深度区分模型。在执行两条主线的过程中交互穿插,最终达到并输出主要研究目标,研究路径如图1所示。

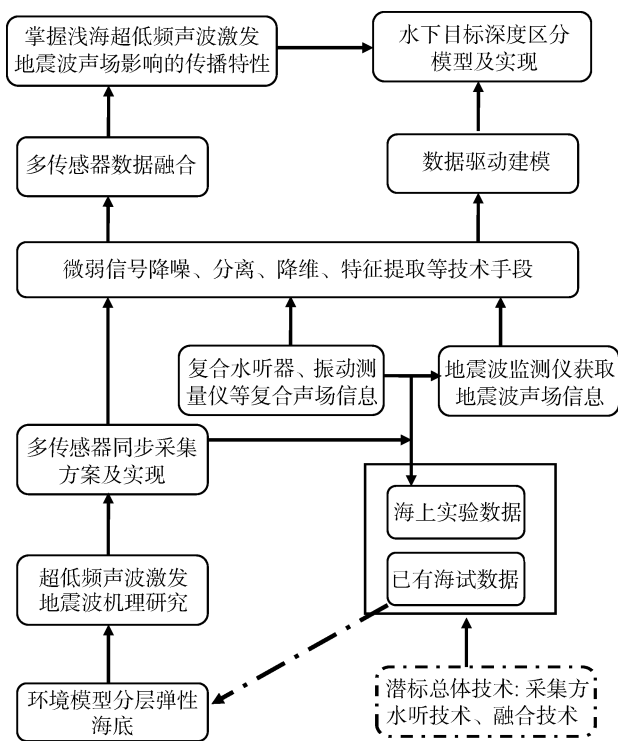


图 1 研究路径  
Fig. 1 Research path

#### 4 多源信息融合的浅海超低频声源目标探测的创新点

在前期研究的基础上,通过对现有试验数据分析处理以及补充试验,以多传感器信息融合为技术手段全面研究浅海超低频声波激发地震波共存的复合声场下的传播特性,结合前期研究中发现的声源处在不同深度时其信号特征变化明显不同,引入大数据处理和科学计算思想,研究超低频声场和震波声场共存的复合声场下数据驱动的目标深度区分模型构建方法。创新之处在于:①研究的超低频声波传播特性是超低频声场与自身激发的地震波声场共存的复合声场中的传播特性;②通过理论分析,数据处理,结合复杂水下环境中矢量水听器、振动测量仪、地震波检测仪等多源数据集成和信息融合算法及融合模型,实现对浅海复合声场中超低频声波传播特性的精确描述;③引入大数据处理及科学计算思想,构建数据驱动的水下目标深度区分模型。

#### 5 结论

以多传感器信息融合为理论指导,建立仿真结果与海试发现的矢量信号特征变化规律一致的浅海

超低频矢量声学模型,在此基础上,形成系统的浅海超低频声源深度分类模式与方法,有效提高水下声探测系统的可靠性,在浅海超低频目标探测、进而研制具有实战意义的装备等方面意义重大。

#### 参考文献:

- [1] 卢晓亭,张林.水声传播建模研究现状综述[J].海洋技术,2010,29(4):48-53.  
Lu Xiaoting, Zhang Lin. Review of sound propagation modeling in underwater warfare environment[J]. Journal of Ocean Technology, 2010, 29(4): 48-53.
- [2] Etter P C.水声建模与仿真[M].蔡志明,译.北京:电子工业出版社,2005.  
Etter P C. Water Acoustic Modeling and Simulation[M]. Cai Zhiming, Translation. Beijing: Electronic Industry Press, 2005.
- [3] Chiu C S, Ehret L L. Three-dimensional acoustic normal mode propagation in the gulf stream[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1994, 28(2): 179-197.
- [4] Cayirci E, Tezcan H, Dogan Y, et al. Wireless sensor networks for underwater surveillance systems[J]. Ad Hoc Networks, 2006, 4(4): 431-446.
- [5] 彭朝晖,张仁和.三维耦合简正波-抛物方程理论及算法研究[J].声学学报,2005,30(2):97-102.  
Peng Zhaohui, Zhang Renhe. On study of the theory and algorithm of the three dimensional coupled mode-parabolic equation[J]. Journal of Acta Acustica, 2005, 30(2): 97-102.
- [6] 贾志富.全面感知水声信息的新传感器技术:矢量水听器及其应用[J].物理,2009,38(3):157-168.  
Jia Zhifu. Novel sensor technology for comprehensive underwater acoustic information: vector hydrophones and their applications[J]. Journal of Physics, 2009, 38(3): 157-168.
- [7] 王任鑫,刘源,张国军,等.基于Parylene封装的宽频带MEMS矢量水听器[J].传感器与微系统,2015,34(8):16-18.  
Wang Renxin, Liu Yuan, Zhang Guojun, et al. Broadband MEMS vector hydrophone based on Parylene encapsulation[J]. Journal of Transducer and Microsystem Technologies, 2015, 34(8): 16-18.
- [8] 彭汉书.浅海声场矢量物理特性及应用研究[D].北京:中国科学院声学研究所,2007.  
Peng Hanshu. Research on the physical characteristics and application of shallow acoustic field vector[D]. Beijing: Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, 2007.
- [9] 陈云飞,吕俊军,于泓.航行舰船地震波及其在水中目标检测中的应用[J].舰船科学技术,2005,27(3):62-66.

- Chen Yunfei, Lü Junjun, Yu Feng. The ship induced seismic wave and its application in the underwater target detection[J]. Journal of Ship Science and Technology, 2005, 27(3): 62-66.
- [10] 张海刚. 浅海超低频声传播建模与规律研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010.  
Zhang Haigang. Research on modeling and rule of infrasound propagation in shallow sea[D]. Haerbin: Harbin Engineering University, 2010.
- [11] 师俊杰. 基于潜标的超低频矢量声场建模与试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011.  
Shi Junjie .Modelling and experiment studies on very low frequency vector acoustic field based on subsurfacebuoy[D]. Haerbin: Harbin Engineering University, 2010.
- [12] 林旺生. 基于矢量声场的水下被动探测与定位技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010.  
Lin Wangsheng. Research on underwater passive detecting and locating technologies based on acoustic vector field[D]. Haerbin: Harbin Engineering University, 2010.
- [13] Schmalfrldt B. Ambient and ship-induced low frequency noise in shallow water, Bottom-interacting ocean acoustic[R]. La Spezia, Italy: SACLANT ASW Research Center, 1989.
- [14] Ali H B, Schmalfeldt B. Seismic sensing of low-frequency radiated ship noise[R]. La Spezia, Italy: SACLANT ASW Research Center, 1984.
- [15] 颜冰, 郭虎生, 李响, 等. 基于单地震波传感器运动目标参数估计方法[J]. 海军工程大学学报, 2012, 24(3): 66-70.  
Yan Bing, Guo Husheng, Li xiang, et al. Moving target parameter estimation based on single seismometer[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2012, 24(3): 66-70.
- [16] 卢再华, 张志宏, 顾建农. 多孔介质水平分层海底低频地震波的数值模拟[J]. 兵工学报, 2014, 35(12): 2065-2071.  
Lu Zaihua, Zhang Zhihong, Gu Jiannong. A numerical simulation of seismic wave caused by low frequency sound source in shallow sea with thick porous sediment by staggered grid finite difference method[J]. Journal of Acta Armamentaria, 2014, 35(12): 2065-2071.
- [17] 李响, 白正勤, 刘旭东. 基于三轴地震波传感器的舰船被动定位方法[J]. 探测与控制学报, 2014, 36(4): 36-39.  
Li Xiang, Bai Zhengqin, Liu Xudong. Passive localization of ship based on triaxial seismic sensor[J]. Journal of Detection&Control, 2014, 36(4): 36-39.
- [18] Xiang Yangzeng, Yan Meizhan. Development of a noise sources classification system based on new method for feature selection[J]. Applied Acoustics, 2005, 66(10): 1196-1205.
- [19] 凌青. 基于多站址信息综合的水下探测定位技术研究. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2006.  
Ling Qing. The study of detection of underwater object based on multistatic sonar system[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2006.
- [20] 王燕. 非合作目标精确定位技术研究. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2006.  
Wang Yan. Research on accurate location technology of disoperative target[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2006.
- [21] 杨娟. 水下动目标被动跟踪关键技术研究. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2007.  
Yang Juan. The studies on passive tracing of underwater moving target[D]. Haerbin: Harbin Engineering University, 2007.
- [22] 惠俊英, 孙国仓, 赵安邦. Pekeris 波导中简正波声强流及其互谱信号处理[J]. 声学学报, 2008, 33(4): 300-304.  
Hui Junying, Sun Guocang, Zhao Anbang. Normal mode acoustic intensity flux in Pekeris waveguide and its cross spectra signal processing[J]. Journal of Acta Acustica, 2008, 33(4): 300-304.
- [23] 莫世奇. 矢量水听器的数据融合研究. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2007.  
Mo Shiqi. Research of data fusion based on vector hydrophones[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2007.
- [24] 张弛. 多矢量水听器的数据融合技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011.  
Zhang Chi. Research of data fusion technology based on multi-vector hydrophones[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2011.
- [25] Gur M B, Niezrecki C. A source separation approach to enhancing marine mammal vocalizations[J]. Acoust Socam, 2009, 126(6): 3062-3070.
- [26] 吕云飞. 超低频矢量水听器潜标探测系统关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010.  
Lü Yunfei. Key technology study of subsurface buoy detection system based on very low frequency vector sensor[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2010.
- [27] 郭虎生, 颜冰, 吴志东, 等. 基于斜投影极化分离算子的船舶地震波场分离方法[J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36(2): 230-233.  
Guo Husheng, Yan Bing, Wu Zhidong, et al. Ship seismic wave field separation method based on oblique projection separation operators[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2014, 36(2): 230-233.
- [28] 徐文, 鄢社锋, 季飞, 等. 海洋信息获取、传输、处理及融合前沿研究评述[J]. 中国科学: 信息科学, 2016, 46(8): 1053-1085.

## Research on techniques in ultra-low-frequency source target detection in shallow seas based on multi-source information fusion

SUN Xian-bin<sup>1, 2, 3</sup>, ZHENG Yi<sup>2</sup>, YU Fei<sup>3</sup>

(1. Institute of Oceanographic Instrumentation, Shandong Academy of Sciences, Qingdao 266001, China; 2. School of Mechanical Engineering, Qingdao Technological University, Qingdao 266033, China; 3. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China)

**Received:** May 11, 2018

**Key words:** multi-source information fusion; shallow seas; ultra-low-frequency; target detection

**Abstract:** Guided by multi-sensor information fusion theory and combined with modern information processing technology, data-driven modeling, and scientific computing technology, in this paper, we study key techniques including determining the super-low-frequency acoustic propagation characteristics of a complex acoustic field and recognizing underwater target depths using data-driven modeling. We also describe the schemes and paths of these technologies. Our results reveal that earlier research on ultralow/low frequency acoustic source targets can overcome the problems in traditional acoustic field modeling, and are helpful in detecting shallow-sea ultralow acoustic source targets and improving the underwater acoustic monitoring method. This work has important theoretical significance for improving the measurement accuracy and precision of Sonar detection equipment, and has practical value for China's coastal defense in shallow sea areas.

(本文编辑: 刘珊珊)