

海洋资料浮标声学特征采集系统设计

王麟煜^{1,2}, 黄海宁¹, 郑恩明¹, 陈新华¹

(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: 为利用我国现有的 10 m 大型资源浮标, 实现对海上侵权船只进行探测和识别, 介绍了一种加装在浮标上的声学特征采集系统设计。该系统设计包括声学基阵设计, 信号采集处理机设计, 目标探测与方位估计算法和声学基阵方位补偿方法等。2014 年 6 月进行了一次湖上试验, 试验结果表明: 声学特征采集系统的硬件可靠, 目标探测、方位估计和方位补偿算法有效。该系统已在我国特定敏感区域开展的维权执法目标探测识别与信息传输技术的信息综合监视中示范应用。

关键词: 海洋资源浮标; 声学特征采集; 最小方差无畸变响应; 方位补偿

中图分类号: TB56

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2019)-05-0508-06

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2019.05.005

Design of the acoustic feature acquisition system of ocean data buoy

WANG Lin-yu^{1,2}, HUANG Hai-ning¹, ZHENG En-ming¹, CHEN Xin-hua¹

(1. Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to use the existing 10 m large buoy of our country to detect and identify the infringing vessels at sea, this paper introduces the design of an acoustic feature acquisition system mounted on the buoy. System design includes acoustic array design, signal acquisition and processing design, target detection and azimuth estimation algorithms and acoustic array azimuth compensation methods. A lake experiment was conducted in June 2014, the experimental results show that the hardware of the acoustic feature acquisition system is reliable, and the target detection, azimuth estimation and azimuth compensation algorithms are effective. The system has been demonstrated and applied in the comprehensive information monitoring of information transmission technology and the detection and identification of right enforcement target in certain sensitive areas of our country.

Key words: ocean data buoy; acoustic features acquisition; minimum variance distortionless response (MVDR); azimuth compensation

0 引言

针对我国特定海域中国海监定期维权巡航执法中存在的对侵权目标缺乏全天候及时、准确监测技术手段的现状, “海洋维权执法目标探测识别与信息传输技术应用研究”项目利用我国现有的 10 m 海洋资料大浮标, 安装声学特征采集系统和高清晰度图像采集系统, 定点获取关键海域舰船信息; 同时通过基于浮标卫星和飞机卫星的高速数据实时传输系统; 将数据信息传到地面监测中心, 结合目标特征数据库, 对侵权目标的特征识别和判断, 实

现远程监测^[1-2]。

声学特征采集系统作为项目的一部分, 以海洋资料浮标为平台, 安装声学基阵和信号采集处理机等, 实现对浮标周边海域的船舶声学特征的采集, 确定目标方位。由于海洋资料浮标受海洋环境的影响大, 浮标在海洋中不停摆动, 同时自身噪声大。声学特征采集系统的设计充分考虑上述因素, 通过声学基阵设计和方位补偿算法, 有效减少了浮标摆动和噪声对声学特征采集系统的影响。

1 系统设计

基于浮标的声学特征采集系统包括声学基阵和信号采集处理机两大部分。系统组成如图 1 所示。

声学基阵由 16 个水听器、1 个电子罗盘和 1 个深度传感器等组成。16 个水听器均匀布放在一个圆周上, 采集舰船的辐射噪声; 采集的模拟信号经

收稿日期: 2018-04-08; 修回日期: 2018-05-21

基金项目: 海洋公益性行业科研专项经费项目(201005001)

作者简介: 王麟煜(1972-), 男, 北京人, 博士, 研究方向为信号与信息处理。

通讯作者: 黄海宁, E-mail: wlyhyh@163.com

信号调理模块的放大、滤波后，在信号采集处理机的 AD(Analog to Digital)板进行模数转换，经 DSP(Digital Signal Processor)板数据处理，确定目标方位，之后经主控板将处理结果传到浮标控制中心。

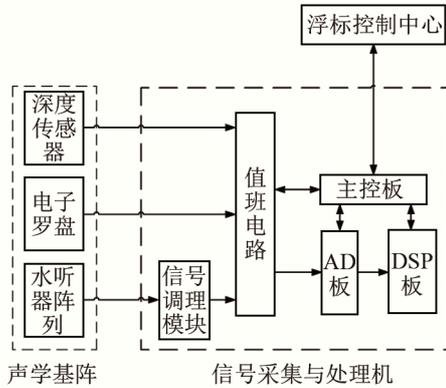


图 1 系统组成图
Fig.1 System composition diagram

2 声学基阵设计

声学基阵设计主要考虑三个方面的影响：(1) 安装声学基阵不能对海洋资料浮标的安全使用造成影响，要求声学基阵最大尺寸不得超过 10 m，重量不大于总重量的 10%；(2) 声学基阵对舰船探测距离不小于 8 km；(3) 减小浮标的振动和噪声对声学基阵采集的影响。水面舰船的辐射噪声谱级主要在 1 kHz 以下，1 kHz 以上噪声谱级随着频率升高以 6 dB/oct 衰减。声学基阵的中心工作频率应在 1 kHz 以下的低频段。声学基阵设计为 16 个阵元均匀分布的圆形阵，直径为 9 m，声学基阵的工作频率小于 373 Hz。声学基阵由 8 根骨架和 8 个连接机构依次首尾连接而成正八边形刚性架^[3]。每根骨架上安装两个水听器模块。水听器模块包括水听器、减震座和导流罩。声学基阵架的实物图和示意图如图 2、3 所示。



图 2 基阵架实物图
Fig.2 The picture of the array frame

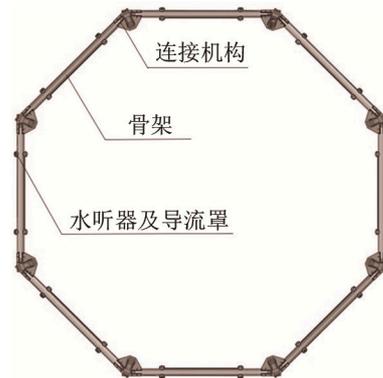


图 3 基阵架示意图
Fig.3 The schematic diagram of the array frame

声学基阵通过高强度绳索与浮体柔性连接，声学基阵悬挂在浮标正下方，距水面 8 m 处。声学基阵与浮标间采用悬挂绳索柔性连接并与浮标本体间隔 8 m 的距离的设计，可有效地减少浮标振动和噪声对声学基阵的影响；浮体底部有 4 个均匀分布在直径为 0.6 m 的圆周上的悬挂点，用于安装连接绳；声学基阵的连接机构上有 8 个挂点，用于安装连接绳。中间通过 4 个导向机构连接，导向机构将上面(浮体到导向装置)4 根绳索和下面(导向装置到基阵架)8 根绳索连接在一起。导向机构如图 4 所示。导向机构上面连接四根绳，下面连接 8 根绳的设计，可以减少缠绕，增加基阵架的稳定性。

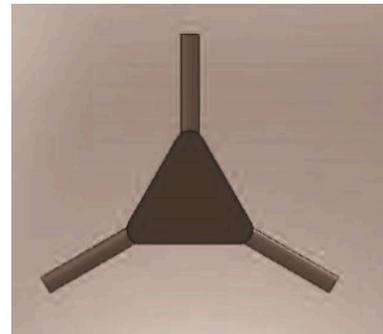


图 4 导向机构示意图
Fig.4 The schematic diagram of the guide mechanism

3 信号采集处理机设计

信号采集处理机由 AD 板、DSP 板、主控板和值班电路板组成，其中 AD 板将前置放大器送来的模拟信号进行可变增益放大、滤波并进行数字化；主控板进行整体管理，实现多线程任务的调度、数据的存储、转发，以及进行部分信号处理工作；DSP 板主要将数字化的信号进行实时高速的处理，并将结果回送到主控板；值班电路主要实现对外部的接口管理，包括深度传感器、电子罗盘上传信号的接

口管理和浮标主控系统的通信，同时对整个信号采集处理机的进行功耗管理和温度参数的监视，根据通讯指令对电路板进行开关操作，节省电源。

3.1 AD 板电路设计

模拟信号经通路保护器、放大器、可编程增益控制器和 AD 芯片，将模拟信号转换为数字信号。采用 CMOS 型通道保护器实现过压保护。放大器实现一级固定倍数的放大；可编程增益控制器实现二级-6、0、6、12、24 倍的增益可调放大；用于进行模数转换的 AD 芯片选择 AD 公司的 ADS1278 芯片，能够完成 8 个通道的同步采样，采样频率为 5 kHz，采样精度为 24 bits；通过板间连接器获得 AD 控制信号，将 AD 转换的数据直接送到主控板的现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)。AD 板电路框图如图 5 所示。

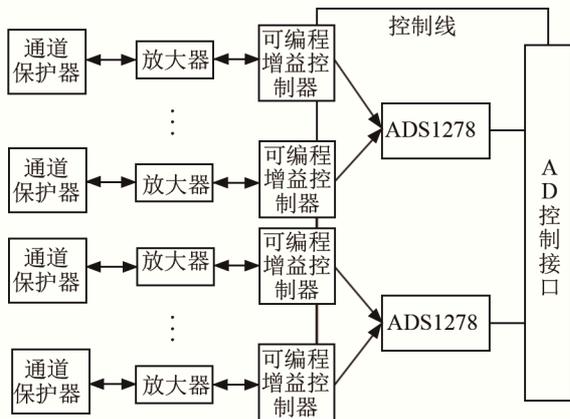


图 5 AD 板电路框图
Fig.5 The block diagram of AD circuit

3.2 DSP 板电路设计

DSP 板电路设计采用低功耗的 TMS320C6747 浮点 DSP 处理器主要完成水声信号处理。TMS320C6747 是浮点 DSP，具有 1800 百万条浮点运行指令的处理能力；提供 512 Mb 的 SDRAM 和 64GByte 的 NAND FLASH。通过 FPGA 提供大容量的 NAND FLASH 芯片阵列完成数据存储工作。DSP 板电路框图如图 6 所示。

3.3 主控板电路设计

主控板电路设计基于 OMAP-L137 双核低功耗应用处理器和 AGL600 低功耗可编程器件，能够实现水声信号处理和浮标控制等。板上外设主要有 SDRAM，NANDFLASH，RTC。外部接口主要有两个 USB 接口，一个 MMC/SD 接口以及外部扩展总线。各个外设和接口的逻辑控制主要由 FPGA 来实现。主控板电路框图如图 7 所示。

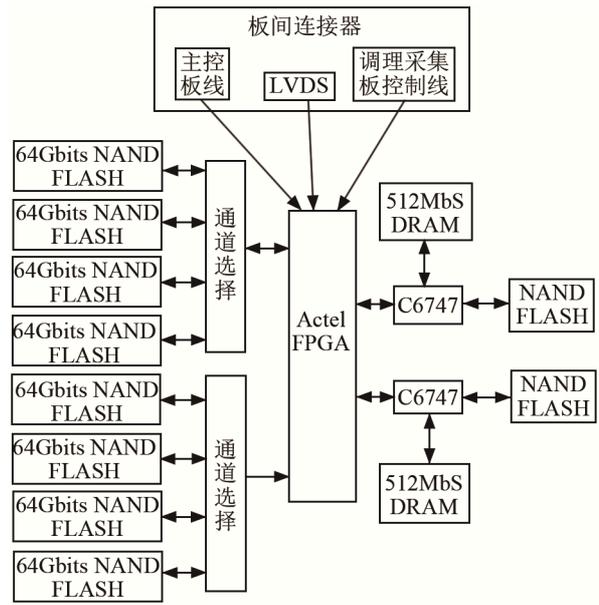


图 6 DSP 板电路框图
Fig.6 The block diagram of DSP circuit

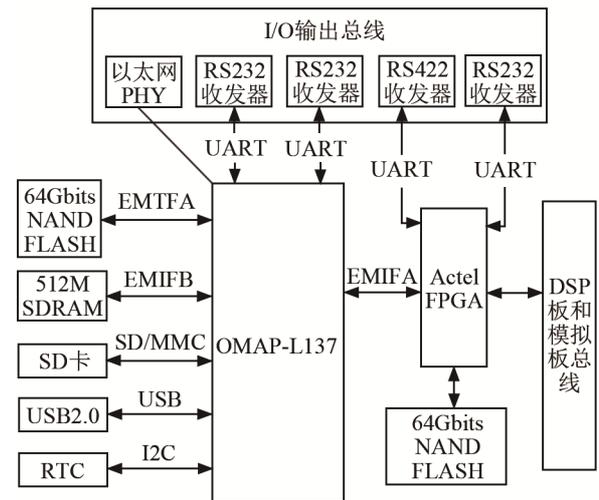


图 7 主控板电路框图
Fig.7 The block diagram of main control board

4 目标探测与方位估计

水听器采集到的声信号经信号采集处理机数字化后，需进行波束形成及后置处理，实现对特定区域舰船目标探测及方位估计，其算法流程如图 8 所示。水听器采集的舰船信号经有限长单元冲击响应滤波器(Finite Impulse Response, FIR)滤波后，进行波束形成和后置处理，确定目标的初始方位，由于声学基阵在水下的姿态不是固定不动的，还需要利用在声学基阵上安装的电子罗盘提供的声学基阵方位信息对目标初始方位进行修正，从而得到目标的真实方位。

4.1 MVDR 波束形成

最小方差无畸变响应(Minimum Variance Distortionless Response, MVDR)的波束形成方法是一种典型的约束最佳波束形成技术^[4-5], 它可使来自于非期望波达方向的干扰响应最小, 且能够保持观察方向的信号功率不变并起到最佳的信号保护、消除干扰和降低噪声的作用。

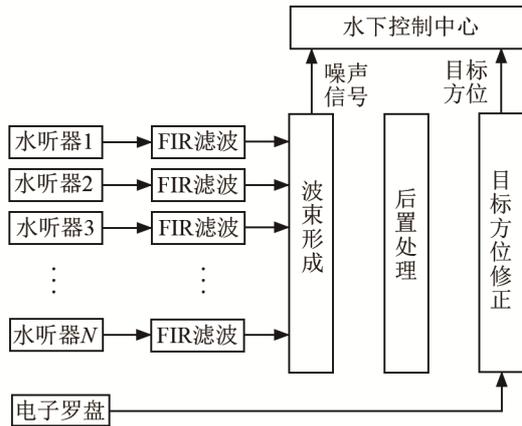


图 8 信号处理流程图
Fig.8 The signal processing flow chart

波束形成是一个多输入、单输出系统, 如图 9 所示。

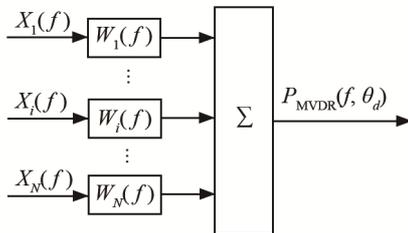


图 9 波束形成示意图
Fig.9 The schematic diagram of beamforming

假设在一个 N 元等间距水平圆形阵中的每个阵元输出信号为 $x_i(t)$, $1 \leq i \leq N$, 经过快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)后在频率单元 f 的响应为 $X_i(f)$, 对 $X_i(f)$ 加权 $W_i(f)$, 再相加所得一个频域的输出为

$$Y(f) = \sum_{i=1}^N W_i^*(f) X_i(f) = W^H(f) X(f) \quad (1)$$

式中: $(\cdot)^*$ 表示共轭; $(\cdot)^H$ 表示共轭转置; $W(f) = [W_1(f), W_2(f), \dots, W_N(f)]^H$; $X(f) = [X_1(f), X_2(f), \dots, X_N(f)]^H$ 。

MVDR 波束形成采用典型的约束最佳波束形成技术, 可表示为

$$\left. \begin{aligned} \min W^H(f) R(f) W(f) \\ \text{s.t. } W^H(f) A(\theta_d) = 1 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: $R(f)$ 为 $X(f)$ 在频率单元 f 的协方差矩阵,

$R(f) = E[X(f)X^H(f)]$, $A(\theta_d) = [1, 2, \dots, e^{-j2\pi f(N-1)\cos\theta_d/c}]^H$, 表示驱动向量, d 为相邻阵元间距, θ_d 为观察方向, c 为平均声速。

求解式(2), 所得 MVDR 波束形成的权向量为

$$W_{MVDR}(f) = \frac{R^{-1}(f)A(\theta_d)}{A^H(\theta_d)R^{-1}(f)A(\theta_d)} \quad (3)$$

由式(3)可知, MVDR 波束形成在观察方向上的输出能量为

$$P_{MVDR}(f, \theta_d) = \frac{1}{A^H(\theta_d)R^{-1}(f)A(\theta_d)} \quad (4)$$

由式(2)可知, 约束可以保护信号, MVDR 波束形成的固定权向量在观察方向的响应为常规相干求和, 其可使噪声以及不在观察方向上的干扰响应最小, 使信号与干扰噪声比增益最大。

另外, 由式(3)和式(4)可以看出, $W_{MVDR}(f)$ 和 $P_{MVDR}(f, \theta_d)$ 与 $R(f)$ 有关, $P_{MVDR}(f, \theta_d)$ 可以作为一种方位估计器, 其估计效果取决于 $R(f)$ 中的噪声量^[6]。

4.2 声学基阵方位补偿方法

声学基阵理想情况是基阵处于水平状态, 但在海上实际使用时, 由于海流和浮标的作用, 声学基阵会横摇和纵摆, 相对与水平面会产生倾角。通常进行波束形成时, 延时时间是按声学基阵处在水平面计算的。如果声学基阵与水平面产生较大倾角, 波束形成估算的目标方位会出现偏差。为此需要对声学基阵进行方位补偿, 保证声基阵正常工作。

图 10 为一个水平面离散均匀间隔的圆阵^[7], 设它的半径为 r , 阵元按顺时针方向编号为 H_1, H_2, \dots, H_i , 把圆心 O 通过阵元 H_1 的方向选作 0° 的方向。相邻两个阵元的夹角是 $\alpha = \pi/8$, 我们把时间的参考点选在圆心 O 上。设入射信号来自 θ 方向, $\tau_i(\theta)$ 为 H_i 相对于 O 点的延时, c 表示水中的声速, 则

$$\tau_i(\theta) = r \cos[\theta - (i-1)\alpha] / c \quad (5)$$

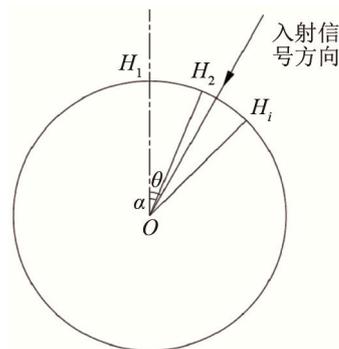


图 10 平面圆阵图
Fig.10 The planar circular array diagram

如果声学基阵与水平面产生倾角,式(5)中 r 不是常数,对于不同的阵元对应不同的 r_i 值。方位补偿方法目的是根据声学基阵方位的变化,确定 r 值,使延时 $\tau_i(\theta)$ 准确,保证目标方位正确。

声学基阵方位补偿方法如下:

(1) 声学基阵上安装一个电子罗盘,电子罗盘可以实时给出声学基阵相对于水平基准面偏角的变化。

(2) 确定声学基阵水平面上 16 个阵元和圆心 O 点的坐标。

(3) 声学基阵与水平面产生倾角,声学基阵的 16 个阵元和圆心 O 向水平面做投影,根据电子罗盘提供的角度,计算出 16 个阵元和圆心 O 的坐标和 r_i 值。

(4) 以其中一个阵元为例,介绍 r_i 值的计算方法。如图 11 所示,声学基阵上的阵元坐标 (x_i, y_i) ,投影到水平面上的坐标 (x'_i, y'_i) 。圆心 O 坐标 (x_0, y_0) ,投影到水平面上的坐标 (x'_0, y'_0) 。 x 轴偏角为 β , y 轴偏角为 γ ,则 r_i 的计算公式为

$$\begin{cases} x'_i = x_i \cos \beta, y'_i = y_i \cos \gamma \\ x'_0 = x_0 \cos \beta, y'_0 = y_0 \cos \gamma \\ r_i = [(x'_i - x'_0)^2 + (y'_i - y'_0)^2]^{1/2} \end{cases} \quad (6)$$

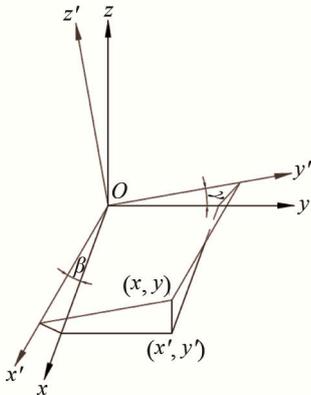


图 11 坐标系转换图
Fig.11 The coordinate transformation diagram

将 r_i 代入式(5),计算 $\tau_i(\theta)$ 。用补偿后的 $\tau_i(\theta)$ 进行波束形成,给出目标的方位。

5 湖试结果分析

2014 年 6 月,在千岛湖上进行了一次湖试。湖试的目的是验证声学基阵的装配性,布放、回收演练;测试系统硬件平台的总体性能,以及验证信号处理算法和声学基阵方位补偿方法的有效性和可靠性。

试验系统框图如图 12 所示。声学基阵布放到

水下 15 m,通过四根电缆将信号连接到信号采集处处理机。声学基阵上系两根绳子,用来调节声学基阵的横摇和纵摆,距离 30 m 处(与声学基阵 180°方向)布放一个发射换能器,通过信号源和功率放大器来发射模拟的舰船噪声信号。

声学基阵处于水平位置时,声学采集系统探测到目标,方位估计角度为 180°方向,与目标实际方位一致。增大换能器与声学基阵之间的距离,当距离达到 8 km 时,声学采集系统仍可以有效探测到目标,系统满足设计指标要求。调整声学基阵上的绳子,使声学基阵处于不同的横摇角和纵倾角,声学采集系统均能够探测到目标,说明方位补偿方法是有效的。

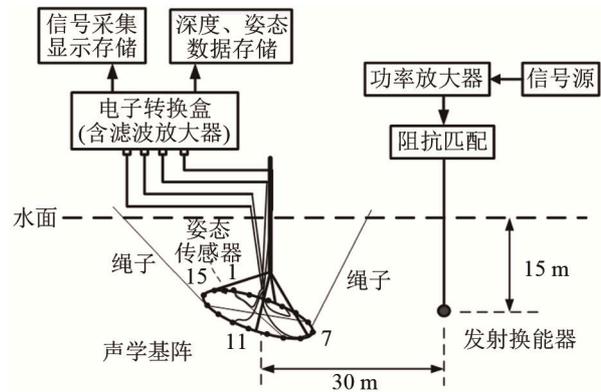


图 12 湖试试验系统框图
Fig.12 Lake trial layout

图 13 为横摇 44°、纵摆 16°目标角度估计对比图。图 13 中 1 代表未补偿的方位历程,3 代表补偿后的方位历程,2 代表未补偿的方位判别结果,4 代表补偿后的方位判别结果。补偿后的方位判别结果与目标真方位基本相同。

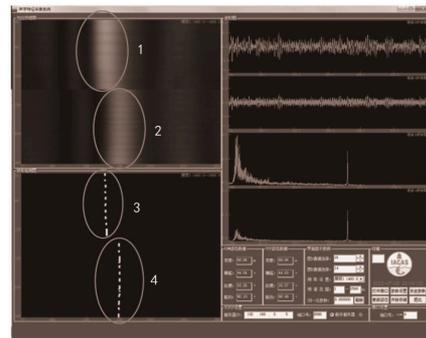


图 13 声学基阵横摇 44°,纵摆 16°,姿态修正前后检测结果对比
Fig.13 Comparison of detection results before and after attitude correction for 44° rolling and 16° pitching

6 结论

湖试试验结果表明,声学采集系统的硬件可

靠、探测目标和方位估计算法工作正常，达到了预期要求；声学基阵装配方便，布放和回收方案可行；声学基阵方位补偿方法有效。因此，该套声学采集系统达到设计要求，可进行下一步工作验证。

目前，该声学特征采集系统已在我国特定敏感区域开展的维权执法目标探测识别与信息传输技术的信息综合监视中示范应用。

参 考 文 献

- [1] 周金元, 唐原广, 赵曙光. 基于海洋资料浮标上目标探测系统的集成设计[J]. 气象水文海洋仪器, 2013, 6(2): 73-76.
ZHOU Jinyuan, TANG Yuanguang, ZHAO Shuguang. Integrated design of target detection system based on marine data buoy[J]. Meteorological, Hydrological and Marine Instruments, 2013, 6(2): 73-76.
- [2] 赵聪蛟, 周燕. 国内海洋浮标监测系统研究概况[J]. 海洋开发与管
理, 2013, 11(2): 13-18.
ZHAO Congjiao, ZHOU Yan. A survey of the domestic marine buoy monitoring system[J]. Ocean Development and Management, 2013, 11(2): 13-18.
- [3] 王麟煜, 余华兵, 孙长瑜. 用于大型海洋观测浮标的声基阵: 中国, ZL 2012 2 0497217.4[P]. 2013-04-03.
WANG Linyu, YU Huabing, SUN Changyu. Acoustic array for large ocean observation buoys: China, ZL 2012 2 0497217.4[P]. 2013-04-03.
- [4] 竺士蒙, 宋明凯, 宫先仪. 一种改善 MVDR 波束形成性能的方法[J]. 声学学报, 1993, 18(1): 54-60.
ZHU Shimeng, SONG Mingkai, GONG Xianyi. A method for improving the performance of MVDR beamforming[J]. Acta Acustica, 1993, 18(1): 54-60.
- [5] 王绪虎, 陈建峰, 韩品. 单个压差式矢量水听器 MVDR 波束形成的优化研究[J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36(3): 434-439.
WANG Xuhu, CHEN Jianfeng, HAN Jing. Optimization for MVDR beamforming based on single pressure gradient vector hydrophone[J]. Systems Engineering and Electronics, 2014, 36(3): 434-439.
- [6] 郑恩明, 黎远松, 陈新华. 改进的最小方差无畸变响应波束形成方法[J]. 上海交通大学学报, 2016, 50(2): 188-193.
ZHENG Enming, LI Yuansong, CHEN Xinhua. Improved bearing resolution approach for MVDR beamforming[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2016, 50(2): 188-193.
- [7] 李启虎. 声呐信号处理引论[M]. 北京: 海洋出版社, 1999, 6(2): 172-177.
LI Qihu. Introduction to sonar signal processing[M]. Beijing: Ocean Publishing House, 1999, 6(2): 172-177.

第 12 届海峡两岸声学学术交流研讨会在西安召开

第 12 届海峡两岸声学学术交流研讨会于 2019 年 8 月 15~17 日在西安市西北工业大学顺利召开。此次大会由上海市声学学会、中国声学学会环境声学分会、陕西省声学学会以及西北工业大学联合主办，香港声学学会、台湾声学学会、台湾噪音与振动学会及澳门声学学会协办。来自大陆、香港、台湾及澳门约 60 余位科研人员、设计人员参与此次交流研讨会。

会议在陕西省声学学会理事长陈克安教授和西北工业大学万小朋党委副书记的欢迎致辞后进入大会学术报告环节，本次会议共交流了 12 篇学术报告，内容涵盖建筑声学、环境声学、噪声治理、振动控制、声景观、航空噪声等多个技术领域。

此次学术交流研讨会既交流了学术，又增进了友谊。大家对本届会议的日程安排、会务组织、论文发表等表示满意，并期待 2020 年第 13 届会议期间再次相聚。

上海章奎生声学工程顾问有限公司
上海市声学学会