

The Design of a Small Buoy System for Detecting Low-Frequency Underwater Acoustic Signals *

SHEN Nixin, YANG Shenghui, WANG Renxin, ZHANG Guojun, ZHANG Wendong*

(Key Laboratory of Instrumentation Science and Dynamic Measurement of Ministry of Education, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: According to the requirements of underwater acoustic signal detection and MEMS vector hydrophone application, a buoy system for detecting low frequency acoustic signals was designed. The system has the advantages of small size, low cost and it is easy to be recycled. This system taking FPGA as a key component is equipped with MEMS vector hydrophone, whose attitude information is given by three-dimensional attitude transducer. After sampling, the output signals of vector hydrophone and the attitude information, will be analyzed and presented by host computer, which realize the detection of underwater signals. This submerged buoy system has been tested, the result shows that its data transmission rate is 2 Mbyte/s, and the signal detecting frequency range is 20 Hz to 1 kHz. At the same time, this system works stably in underwater environment and it is able to record underwater acoustic signals correctly.

Key words: underwater acoustic measurement; submersible buoy; FPGA; MEMS; vector hydrophone

EEACC: 7810C

doi: 10.3969/j.issn.1005-9490.2019.02.044

应用于低频水声信号探测的小型潜标系统设计 *

沈倪鑫, 杨晟辉, 王任鑫*, 张国军, 张文栋

(中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 太原 030051)

摘 要: 针对水声信号探测和 MEMS 矢量水听器工程应用的需求, 设计了一种应用于低频水声信号探测的小型潜标系统, 该系统具有体积小、成本低、布放回收简便等优点。系统以 FPGA 为控制核心, 控制三维姿态传感器采集 MEMS 矢量水听器姿态信息; 同时将采集到的水听器信号一起传输至上位机分析和显示, 实现水声信号的探测。实验结果表明: 该系统数据传输速率为 2 Mbyte/s, 探测信号频段范围为 20 Hz~1 kHz; 该系统在水下工作稳定, 可正确记录水声信号。

关键词: 水声测量; 潜标; FPGA; MEMS; 矢量水听器

中图分类号: O427.9; TB56

文献标识码: A

文章编号: 1005-9490(2019)02-0497-04

随着海洋资源和环境的不断开发^[1], 潜标探测系统作为水下环境监测仪器和主要技术手段得到了越来越广泛的应用, 潜标探测系统能够在海洋下进行长时间、不间断、隐蔽地工作^[2-3], 可以很好地探测水中移动目标以及各种海洋环境信息, 对于海洋研究和综合利用有重要的意义。

微机电系统 MEMS (Micro Electromechanical Systems) 矢量水听器具有体积小、一致性好、指向精度高优点, 易于组阵, 且阵列化不受二分之一波长

限制, 能够满足小孔径、远距离探测声呐的发展需求^[4]; 此外, MEMS 矢量水听器还有很好的抗干扰性, 能够在低频和甚低频条件下实现对水下声目标的探测。本文设计的潜标系统旨在充分发挥 MEMS 矢量水听器体积小、成本低、性能好等优势, 设计了一种新的潜标结构, 与传统潜标相比具有结构更精简、体积更小、成本更低、布放与回收更简便等优点, 为 MEMS 矢量水听器的实际应用提供了试验平台, 同时为其进一步工程化应用奠定基础。

项目来源: 国家自然科学基金项目 (61127008); 国家重点研发计划项目 (2016YFC0101900); 山西省应用基础研究项目 (201601D011035)

收稿日期: 2018-03-05 修改日期: 2018-05-17

1 MEMS 矢量水听器

MEMS 矢量水听器是将压阻效应、仿生学、MEMS 技术综合应用而研发的一种新型矢量水声传感器^[5-6]。MEMS 矢量水听器的敏感单元由四梁微结构和敏感柱体组成,传感器的四梁微结构及整体如图 1 所示。四梁臂上通过扩散工艺加工有 8 个阻值相等的应变压敏电阻,构成两个惠斯通电桥,其中 $R_1 \sim R_4$ 构成检测 X 方向信号的电桥, $R_5 \sim R_8$ 构成检测 Y 方向信号的电桥。

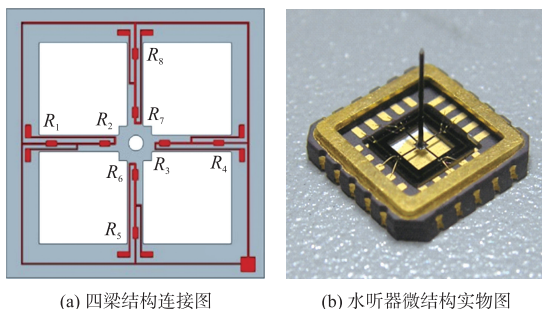
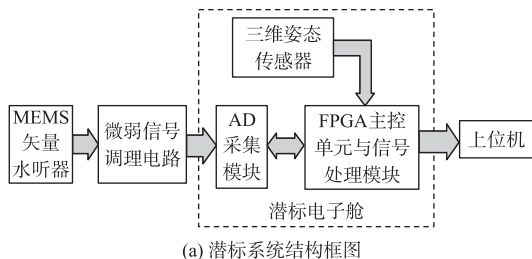


图 1 MEMS 矢量水听器微结构

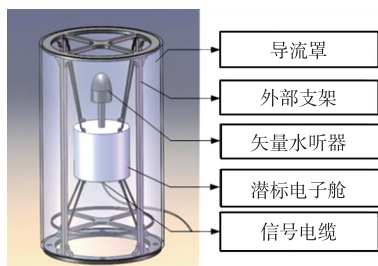
工作时,敏感柱体与声信号产生振动谐振,柱体摆动引起敏感柱体底部质量块与悬臂梁产生相应形变,形变导致梁上的压敏电阻阻值产生相应变化,从而产生相应的电信号^[7-9]。MEMS 矢量水听器能够检测平面内 X 、 Y 两个方向的振速分量,从而实现目标方位估计;同时,该结构可以消除各向同性噪声,更有利于微弱信号检测。

2 潜标系统结构

潜标系统的结构框图如图 2(a) 所示,主要包括微弱信号调理模块与数据处理模块;其整体结构如



(a) 潜标系统结构框图



(b) 潜标系统整体结构图

图 2 潜标系统的结构示意图

图 2(b) 所示。MEMS 矢量水听器固定于空心扩展支杆一端,扩展支杆另一端固定在潜标电子舱的顶部,其长度为 10 cm,潜标系统外部直径为 20 cm,高度为 50 cm,总体质量不超过 15 kg。矢量水听器的输出信号传输至潜标电子舱。电子舱内部安装有三轴姿态传感器,该传感器用以给出潜标电子舱和矢量水听器的水下姿态信息,以实时了解水听器所处的环境状况,方便后续算法处理。整个系统外部装有导流罩,以降低流噪声的影响^[10]。系统数据经过底部的水密电缆和转接件传输至上位机进行显示。

3 微弱信号调理模块

针对检测低频水声信号的 MEMS 矢量水听器,其输出信号很微弱且易被噪声淹没,潜标系统通过信号调理模块对水听器输出信号进行预处理。信号调理模块采用双电源供电,对矢量水听器输出的微弱信号进行放大与滤波,信号增益为 49.4 dB,通带范围为 5 Hz~3 kHz。微弱信号调理模块对矢量水听器的信号预处理过程如图 3 所示。



图 3 微弱信号调理过程示意图

MEMS 矢量水听器作为一种压阻式传感器,其信号调理要求运放具备低电压噪声、低失调电压和高共模抑制比。综合考虑,信号调理模块的放大电路选用了一款极低噪声、超低偏置电流、高共模抑制比的仪表放大器 INA163,其最大输入电压噪声为 $1 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$;同时为滤除水声信号中掺杂的高频成分毛刺,需对信号进行低通滤波处理,选取 ADI 公司生产的具有超低噪声、超低失真度、单位增益稳定的电压反馈型运算放大器 ADA4898,搭建 Sallen-Key 结构型四阶低通滤波电路,该滤波电路的设计使用可降低信号的失真度以及压缩噪声带宽,该低通滤波器截止频率设置为 3 kHz。

4 潜标数据处理模块

潜标数据处理模块以 Spartan3E-XC3S100E FPGA 为控制和数据处理核心,实现对矢量水听器和三维姿态传感器输出信号的采样、编帧和传输。潜标电子舱的电路结构如图 4 所示。

MEMS 矢量水听器输出信号经过调理模块后,由 A/D 转换器完成采样,采样率为 10 kHz。A/D 转换器选用 ADI 公司的 16 位、8 通道同步采样模数转换器 AD7606,该转换器具有片内滤波和高输入阻抗的优点,且无需驱动运算放大器。三维姿态传感器选用

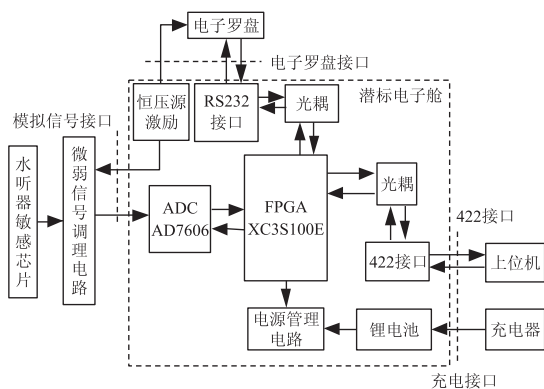


图4 潜标电子舱电路结构图

XW-EC1700 三维固态电子罗盘,可以给出潜标水下姿态信息:磁北角、俯仰角、横滚角,精度为 0.1° ,输出为 RS-232 格式数据,波特率为 9 600 bit/s,速度最高可达 12 次/s。姿态信息经串口转换后送入 FPGA,和同时刻 A/D 采样数据编码。数据通过水密电缆和 RS-422 接口与 PC 机连接,通过上位机进行数据的读取、分析和存贮,方便后续进行算法处理。

5 试验结果

对潜标探测系统进行室内驻波声场测试,目的是验证 MEMS 矢量水听器的指向性,同时验证该潜标探测系统能否成功检测到水声信号。将 MEMS 矢量水听器放入驻波管中,潜标探测系统采集水听器的输出信号并传输至上位机。实验过程中, MEMS 矢量水听器的 X 通道与 Y 通道接收固定声源的单一频率信号,同时转动矢量水听器,两个通道波峰值发生变化,当 X 通道波形包络变大时 Y 通道波形包络减小,体现出矢量水听器的指向性。X、Y 通

道波形包络图如图 5(a) 所示。然后驻波管发射单一频率的正弦波,通过上位机软件读取潜标系统采集到的声信号数据,并用 MATLAB 对数据分析得到信号波形及频谱图,结果如图 5(b) 所示。

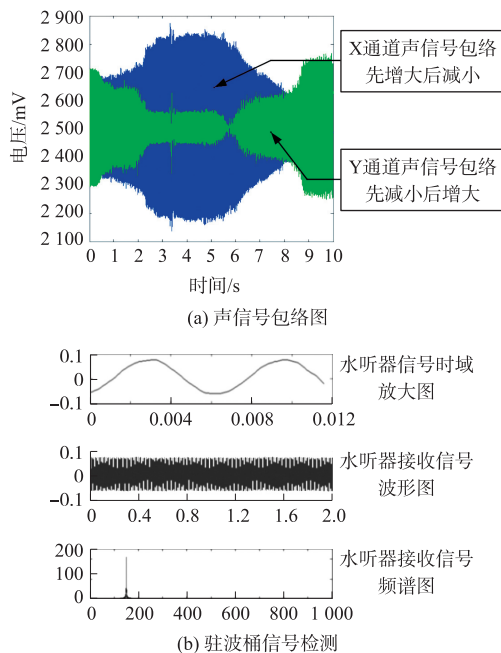


图5 室内测试结果图

潜标探测系统经过实验室驻波场试验验证后,在太原汾河水库对系统进行了测试,试验水域水深约 40 m,水听器与潜标探测系统布放深度约为 10 m。测试过程中,声源船携带的发射换能器发射 20 Hz~1 kHz 内单频声信号,当声源船在水面不同的位置发出不同频率后,潜标探测系统将接收声信号并在上位机上显示,图 6 为潜标系统检测信号的频谱分析图,图中标示了声源船在不同位置发出声信

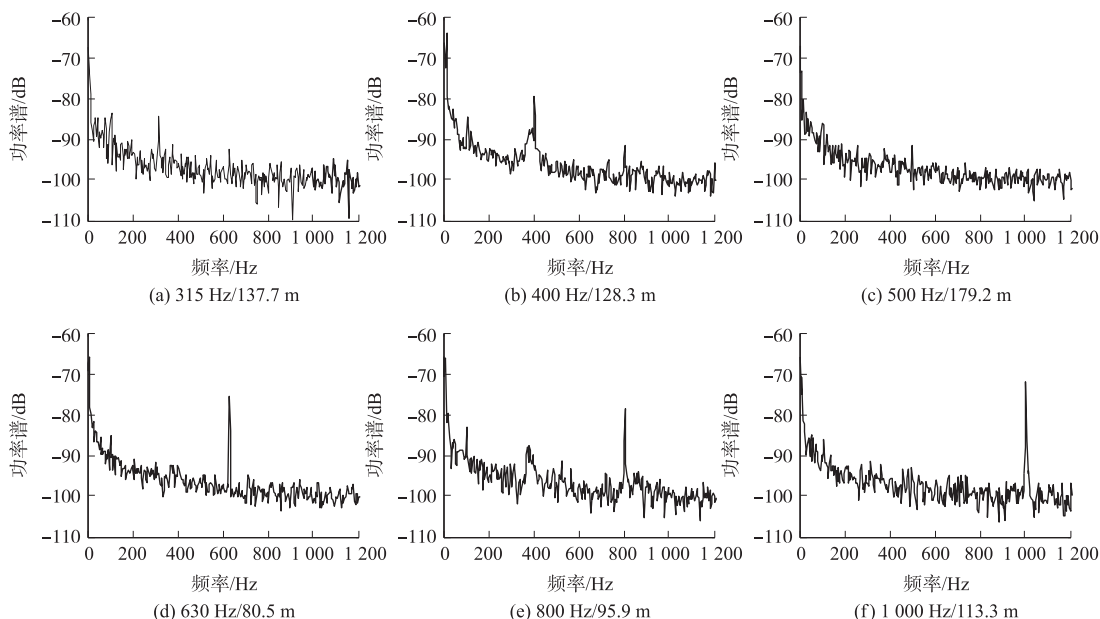


图6 水听器接收信号频谱分析图

号的频率和该位置与潜标探测系统之间的距离。从图中可以看出:该潜标探测系统能够准确探测到处在不同位置的发射换能器发出的不同频率的声信号,验证了该潜标探测系统的性能。

6 结论

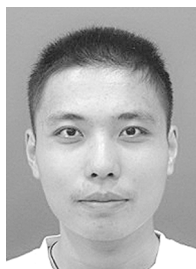
本文针对 MEMS 水听器在海洋开发研究、探测中的实际应用需求,设计了一种体积小、成本低的小型潜标系统,同时进行了 MEMS 矢量水听器在水下环境适应性和工程应用的研究。经过多次实验室测试和湖上试验验证,本文设计的基于 MEMS 矢量水听器的潜标探测系统可用于水下声信号探测,为 MEMS 矢量水听器的实际应用搭建了试验平台,同时也为 MEMS 矢量水听器开拓更广阔的工程应用奠定了试验基础。

参考文献:

[1] 林香红,陈刚. 中外海洋经济概念的共性和差异性分析[J]. 海

洋开发与管理,2012,29(5):116-118.

- [2] 毛华斌,王关养,陈荣裕. 两组海洋深水潜标系统的对比分析[J]. 气象水文海洋仪器,2005(3):9-11.
- [3] 邹吉武,孙大军,吕云飞,等. 基于矢量传感器的海洋声场观测潜标系统[J]. 传感器与微系统,2009,28(10):82-84.
- [4] 樊姣荣,王晓瑶,刘文怡,等. MEMS 矢量水听器阵列信号处理研究[J]. 传感器与微系统,2012,31(1):14-16.
- [5] Zhang W D, Xue C Y, Xiong J J, et al. Piezoresistive Effect of Resonant Tunneling Structure for Application in Micro-Sensors[J]. Indian Journal of Pure and Applied Physics, 2007, 45: 294-298.
- [6] 许姣,张国军,石归雄,等. 纤毛式矢量水听器新型封装结构的研究[J]. 传感技术学报, 2011, 24(4): 517-521.
- [7] Xue C Y, Chen S, Zhang W D. Design Fabrication and Preliminary Characterization of a Novel MEMS Bionic Vector Hydrophone[J]. Microelectronics Journal, 2007, 38: 1021-1026.
- [8] Xue C Y, Tong Z M, Zhang B Z, et al. A Novel Vector Hydrophone Based on the Piezoresistive Effect of Resonant Tunneling Diode[J]. IEEE Sensors J, 2008, 8(4): 401-402.
- [9] 张振宇. 光纤矢量水听器噪声声场特性分析[D]. 国防科学技术大学, 2008.



沈倪鑫(1992-),男,汉族,江苏无锡人,中北大学仪器与电子学院,电子与通信工程专业在读硕士研究生,主要研究方向为动态测试技术与智能仪器,shennixin@126.com;



王任鑫(1987-),男,汉族,江西萍乡人,博士,副教授,2013年起任职于中北大学仪器与电子学院,主要研究方向为 MEMS 传感器件及系统设计与制造,417960627@qq.com。