

海洋精细化漂流浮标观测网络实验

李宾¹, 张文^{1*}, 厉运周², 赵强², 徐登科¹

(1. 国防科技大学 气象海洋学院, 湖南 长沙 410073; 2. 齐鲁工业大学(山东省科学院)
海洋仪器仪表研究所, 山东 青岛 266061)

摘要:设计了一种创新型海洋精细化漂流浮标及其组网观测系统。浮标硬件采用自研分离式抗风浪结构与低功耗核心组件集成技术,结合双天线通信架构通过实验室测试和野外湖试,量化评估浮标的测量精度、环境适应性和数据稳定性。基于LoRa的分布式物联网通信技术,创新地采用拓扑组网架构,构建4节点10 km级立体观测网络,丢包率<0.1%,利用快速傅里叶变换(FFT)频谱分析数据特征并提出降噪方法。实验表明,该网络可同步捕获准稳态海洋环境数据,为高密度、立体化、精细化海洋监测提供可扩展解决方案。研究成果已应用于教学实践,并计划扩展至10节点网络,推动海洋精细化观测技术的工程化应用。

关键词:海洋漂流浮标;浮标观测网络;物联网通信技术;LoRa 无线通信技术

中图分类号:P715.2 文献标志码:A 文章编号:1002-4026(2025)06-0022-07

开放科学(资源服务)标志码(OSID):



Experiment on a fine-scale marine drifting buoy observation network

LI Bin¹, ZHANG Wen^{1*}, LI Yunzhou², ZHAO Qiang², XU Dengke¹

(1. College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;
2. Institute of Oceanographic Instrumentation, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Qingdao 266061, China)

Abstract: An innovative marine fine-scale drifting buoy and its networked observation system were designed. The buoy hardware featured a self-developed detachable wave-resistant structure and low-power core component integration technology. With the help of its dual-antenna communication architecture, the buoy was subjected to laboratory and field lake tests to quantitatively evaluate its measurement accuracy, environmental adaptability, and data stability. Based on LoRa-enabled distributed IoT communication technology, an innovative topological networking architecture was used to construct a four-node, 10 km-scale 3D observation network with a packet loss rate of less than 0.1%. FFT spectral analysis was conducted to analyze data features, and a noise reduction method was proposed. Test results showed that the network could synchronously capture quasi-steady-state ocean environmental data, providing a scalable solution for high-density, multi-dimensional, fine-scale ocean monitoring. The research results were applied in teaching practice. In addition, expansion to a 10-node network has been planned to advance the engineering application of fine-scale ocean observation technology.

Key words: marine drifting buoy; buoy observation network; Internet of Things communication technology; LoRa

收稿日期:2025-05-09 修回日期:2025-05-26

基金项目:山东省重点研发项目(2023ZLYS01)

作者简介:李宾(2004—),男,本科生。E-mail:18873192712@163.com

* 通信作者,张文,女,副教授,研究方向为海洋信息处理。E-mail:zhangwen06@nudt.edu.cn, Tel:18684810732

海洋浮标是现代海洋监测的重要工具,具有长期、连续、全天候自动观测等特点,服务于海洋预报、防灾减灾、海洋经济、海上军事活动等领域^[1],受到世界各国重视。美国通过部署大量低成本浮标来构建分布式传感器网络,从而有效实现海洋态势感知,为海洋监测开辟了全新的思路和方法。我国海洋浮标研究起步较晚,在浮标组网能力、数据传输效率和工作可靠性等方面还比较薄弱^[2]。

随着海洋强国战略的推进,浮标布放向多站位、高密度方向发展,形成全覆盖、立体化的海洋浮标监测网络^[3]。我国海洋面积广阔,构建海洋监测网络较为困难。目前大部分海洋监测浮标采用卫星通信或移动通信的方式。卫星通信虽然覆盖范围广,但通信费用高。移动通信网络依赖移动运营商基站,传输距离有限,无法满足海洋监测要求。此外卫星通信或移动网络均为单跳通信模式,难以支撑多节点浮标网络,浮标间组网协同观测能力不足。大部分浮标体积大重量重,造价成本高,不适合大量布放,无法实现海洋要素的精细化采集。

针对传统海洋浮标组网能力弱、通信效率低等问题,本文提出并实现了一种创新型海洋精细化漂流浮标及其组网观测系统。基于模块化设计理念,优化浮标机械结构,采用分离式旋转头增强流体稳定性,集成高精度 MS5837 压力传感器与 STM32 主控单元,配置双天线(LoRa/北斗)实现多模态通信;构建多维度性能验证体系,通过实验室恒温常压测试与长沙市楚家湖野外对比实验,量化验证了单个浮标的测量性能、环境适应性及连续运行可靠性;开发基于物联网远距离无线电(long range radio, LoRa)技术的分布式组网架构,通过动态路由算法实现 4 节点浮标网络的自组织通信,并结合北斗短报文构建“空-水”一体化数据传输通道,实现 10 km 间距丢包率 $<0.1\%$ 的高性能通信。实验表明,该系统可在复杂水文条件下同步获取温压-位多维度数据,其组网通信时延低于 200 ms,为建立高分辨率海洋立体监测网络提供了可工程化推广的技术范式。

1 浮标整体结构

1.1 浮标外观

浮标采用黄红鲜明配色,便于水下快速定位(如图 1)。其外形为圆柱体,两端是自研凹凸型分离式旋转头,使头部与筒身贴合更牢固,增强浮力和稳定性,同时简化了组装和拆卸。顶部旋转头还接有两根高灵敏度天线,分别用于数据传输和定位跟踪。



图 1 浮标外观

Fig.1 Appearance of the buoy

1.2 浮标硬件设计

浮标的硬件设计是其功能实现的核心基础。图 2 中展示了浮标的详细构造。转换头左侧采用分体式模块化设计,集成了电源与通信模块,配备大容量长续航电源、精密控制装置以及双频天线系统。通过频段隔离、空间优化布局及独立信号处理算法,确保天线互不干扰。转换头右侧为传感器和内部设备模块,采用可重构集成架构,包含可充电电池、智能控制电路以及高精度温深传感器。控制头 2 号口智能控制电路,根据浮标工作状态动态调整供电,优化能量利用效率。电池模块通过转接头 4 号口充电,紧急时无需拆卸浮标即可充电。

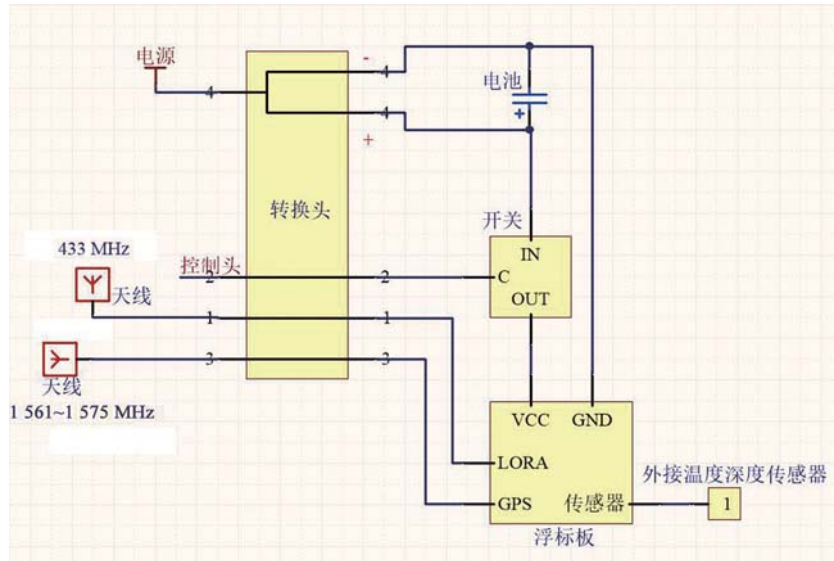


图2 浮标硬件结构设计

Fig.2 Hardware structure design of buoy

天线可扩大浮标信号传输距离和范围。433 MHz 天线通过转换头 1 号口连接浮标内部 LoRa 模块,实现浮标与岸基监控中心以及浮标之间的远距离数据传输。1 561~1 575 MHz 天线通过 3 号口连接北斗导航模块,接收北斗卫星导航系统的定位信号,为浮标提供高精度的定位服务,保障浮标在海上作业时的位置信息准确,便于对浮标的实时位置跟踪与监控。

电路板是浮标核心控制单元,采用 STM32 系列芯片,具备高性能、低功耗、高可靠性等特点。所有功能传感器集中在一块 STM32 主板上,通过程序管理实现稳定工作和数据传输。

传感器模块核心为进口 MS5837 大量程高分辨率传感器,量程约 3 MPa(300 m 水深),破坏量程 5 MPa。它包含高精度压力传感器和超低功耗 24 位模数转换器(ADC),通信协议简单,无需复杂寄存器配置。该传感器固定在浮标筒下方盖上,通过排线与浮标板相连,防止风浪导致内部故障。

2 单个浮标性能测试

2.1 浮标实验室测试

为全面评估浮标的单体性能,在受控实验室环境下开展了系统性测试,涵盖传感器精度、防水密闭性及抗风浪稳定性 3 大核心指标。

2.1.1 传感器精度测试

实验采用双机对比测试方案,选取两台浮标设备作为实验组与对照组。将两浮标的温深传感器固定于标准恒温水槽(控温精度 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$)内 15 cm 水深处,水温设定为 $27\text{ }^{\circ}\text{C}$,以 1 Hz 采样率连续采集 150 s 原始数据。数据处理阶段,基于 Python 对原始数据进行预处理,采用滑动平均滤波消除高频噪声,随后计算温度与压力的均值、方差,关键性能指标统计结果见表 1。

表 1 关键性能指标

Table1 Key performance indicators

浮标序号	温度平均值/ $^{\circ}\text{C}$	温度方差	压强平均值/hPa	压强方差
1	26.81	2.50×10^{-4}	1 028.35	0.29
2	27.03	2.60×10^{-4}	1 028.07	0.30

为了更加直观展示温度、压强随时间的变化情况,通过 Origin 软件对两组数据进行简单绘图,如图 3 所示。

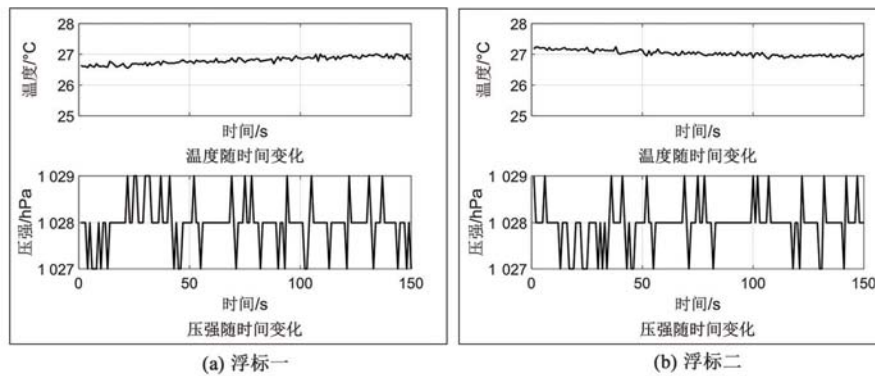


图3 室温下浮标记录的温度压强变化曲线

Fig.3 Temperature and pressure curves recorded by the buoy at room temperature

室温下,标准大气压为 1 013.25 hPa, 15 cm 纯水产生 14.7 hPa 的压强,故浮标测得的理论压强应为 1 027.95 hPa。由表 1 可知,浮标一温度实验值为 26.81 °C,浮标二温度实验值为 27.03 °C,与理论值 27 °C 的相对误差分别为-0.70%和 0.11%。浮标一的压强实验值为 1 028.35 hPa,浮标二的压强测量值为 1 028.07 hPa,与理论值 1 027.95 hPa 的相对误差分别为 0.038 9%和 0.011 7%。此外,浮标一温度值稳定维持在(26.8±0.3)°C 范围内,压强值波动幅度为(1 028±1) hPa;浮标二温度值则稳定在(27.0±0.3)°C 区间,压强波动范围同样为(1 028±1) hPa。温度数据的离散程度极低,方差分别为 2.50×10^{-4} (浮标一)和 2.60×10^{-4} (浮标二),对应标准差仅 0.016;压强方差值为 0.29 与 0.30。表明浮标所测量数据具有较好的准确性与稳定性。

2.1.2 防水能力测试

为避免偶然误差影响实验结果,对两个浮标进行防水能力测试。将两个浮标淹没于 5 m 水深处并在 1 h 后观察浮标内部是否有水渗入。经过 1 h 的浮标防水测试,浮标拆开未见明显水渍,可见浮标具有良好的防水性能。

2.1.3 抗风浪性能测试

为了测试浮标在遭遇风浪时是否具备良好的抗风浪性能,将其放置在模拟风浪的水桶中进行实验。在风浪影响下,浮标能够始终恢复到水桶内同一位置。人为进行干扰后,浮标回正时间大约为 1 s。可见此浮标具有良好的抗风浪能力。

2.2 浮标野外湖试

为了验证浮标在野外环境下的数据采集与接收能力,我们在长沙市楚家湖水域进行了 0.5 h 的数据采集实验。回收数据后,首先对数据进行了初步处理,绘制了野外环境下浮标记录的温度压强变化曲线(图 4)。通过数据分析,除去布放浮标初期引起的较大变化和人为改变浮标深度所引起的变化外,温度值稳定在(27.5±0.5)°C 的范围内,压强只有±1 hPa 的偏差,有良好的稳定性。

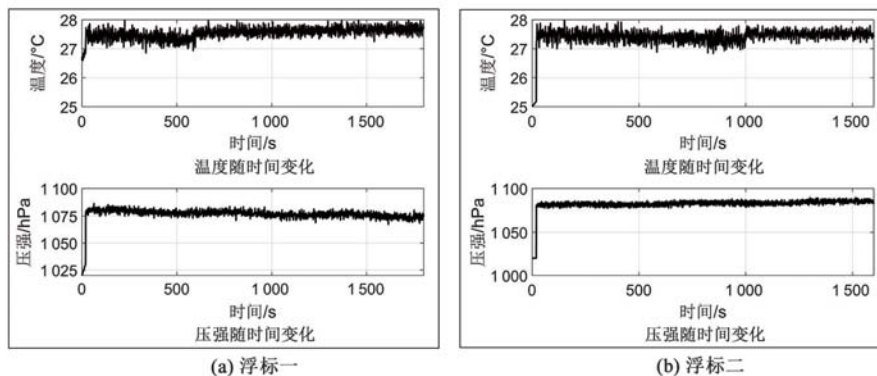


图4 野外环境下浮标记录的温度压强变化曲线

Fig.4 Temperature and pressure curves recorded by the buoy under field conditions

3 浮标组网联调

3.1 数据远距离无线传输技术

海上监控浮标的通信技术主要采用卫星通信与移动通信,二者在应用场景中呈现出显著的互补特征,但这一模式在最新的应用场景下已不具优势。卫星通信覆盖广、距离远,但成本高^[4];移动通信速率高、稳定,但距离短、功耗大、受海洋环境影响大,无法实现海洋通信网络覆盖^[5]。物联网技术是近年兴起的通信技术,通过传感设备按协议连接网络,实现物体的身份、位置和状态识别。物联网通信方式有 ZigBee、蓝牙、Wi-Fi、LoRa、NB-IoT 等。ZigBee 技术因具备网络容量大、抗干扰能力强的特点,在现有研究中获得较多应用。但 ZigBee 通信距离短,增加节点会大幅提高功耗。而 LoRa 低功耗、远距离的优势在海洋通信中尤为突出,相比其他物联网通信方式更具优势^[6]。

3.2 拓扑组网技术

基于水声传感器网络架构,本文采用分布式拓扑组网技术构建海洋浮标观测网络^[7]。浮标拓扑组网如图 5 所示,各浮标节点通过集成 LoRa 通信模块实现多跳自组网,形成动态数据链路。该网络支持两种数据传输模式:(1)浮标间通过 LoRa 自组网实现数据接力传输,结合动态路由算法实时调整数据传输路径,优化信号覆盖范围;(2)关键节点通过北斗短报文或卫星通信回传数据至岸基中心,满足深海远距离监测需求。拓扑组网技术可实时同步多节点数据,实现对海洋环境参数的时空连续观测,显著提升海洋现象捕捉的完整性与时效性。

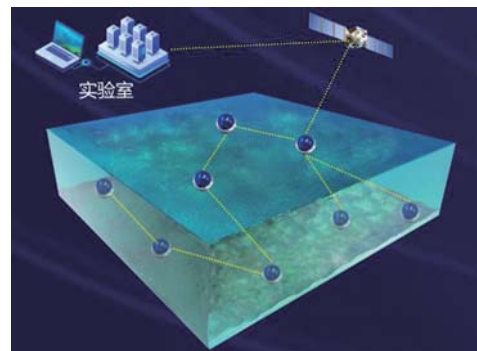


图 5 分布式浮标拓扑网络示意图

Fig.5 Distributed buoy topology network

本文中,我们采用 AS32-TTL-100 工业级 LoRa 模块作为组网核心。AS32-TTL-100 是一种性能稳定的 LoRa 通讯模块,具备高性能距离、高抗干扰性和低功耗的特性。其采用 Semtech SX1278 射频芯片,发射功率 100 mW (20 dBm),接收灵敏度达 -148 dBm,配合 1/2/4/8/16/64 扩频因子可调,在复杂海洋环境中实现理论 10 km 级稳定传输(丢包率 < 0.1%);支持 (410~441) MHz 频段内 32 个独立信道划分^[8],配合正交扩频码技术,确保多节点并发通信时零冲突^[9];支持四级智能功耗模式(正常/省电/唤醒/休眠),休眠电流仅 1.5 μ A,配合动态功率调整算法,可使浮标在无数据时段能耗降低至标准模式的 0.3%。为防止海水腐蚀与机械冲击,模块采用铝合金密封外壳,内部填充聚氨酯灌封胶,如图 6 所示。



图 6 电脑端 LoRa 接收模块及封装后效果

Fig.6 LoRa receiver module for PC and its packaged appearance

3.3 组网实验结果与分析

二田湖位于国防科技大学三号院二号田径场旁,实验环境气温为 25 $^{\circ}$ C,风速较小,湖水平静,环境对于本次实验影响较小。实验开始时间为 15:00,结束时间为 16:00,共持续 1 h。由于条件限制,进行了 4 个浮

标的组网实验。在进行湖中实验之前,首先对4个浮标进行了调试。调试结束后,划船至湖中央将浮标按方形阵相距5 m进行一次布放。信号接收机布放在距离阵中心10 km处。实验结束时,对所有浮标进行了收尾工作并完成了数据记录。对浮标进行检查,未见明显漏水。

在浮标采集数据时,利用XCOM V2.0软件接收浮标传输的数据。XCOM V2.0软件接收浮标采集数据界面如图7所示。

对采集到的数据使用绘图软件进行绘图。浮标温度及压强变化如图8所示。

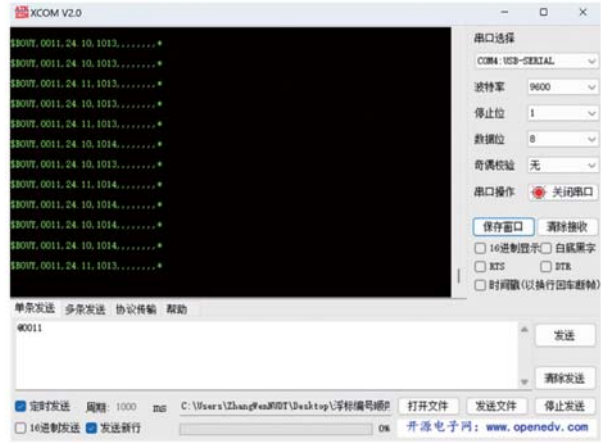


图7 XCOM V2.0接收浮标数据界面

Fig.7 XCOM V2.0 buoy data reception interface

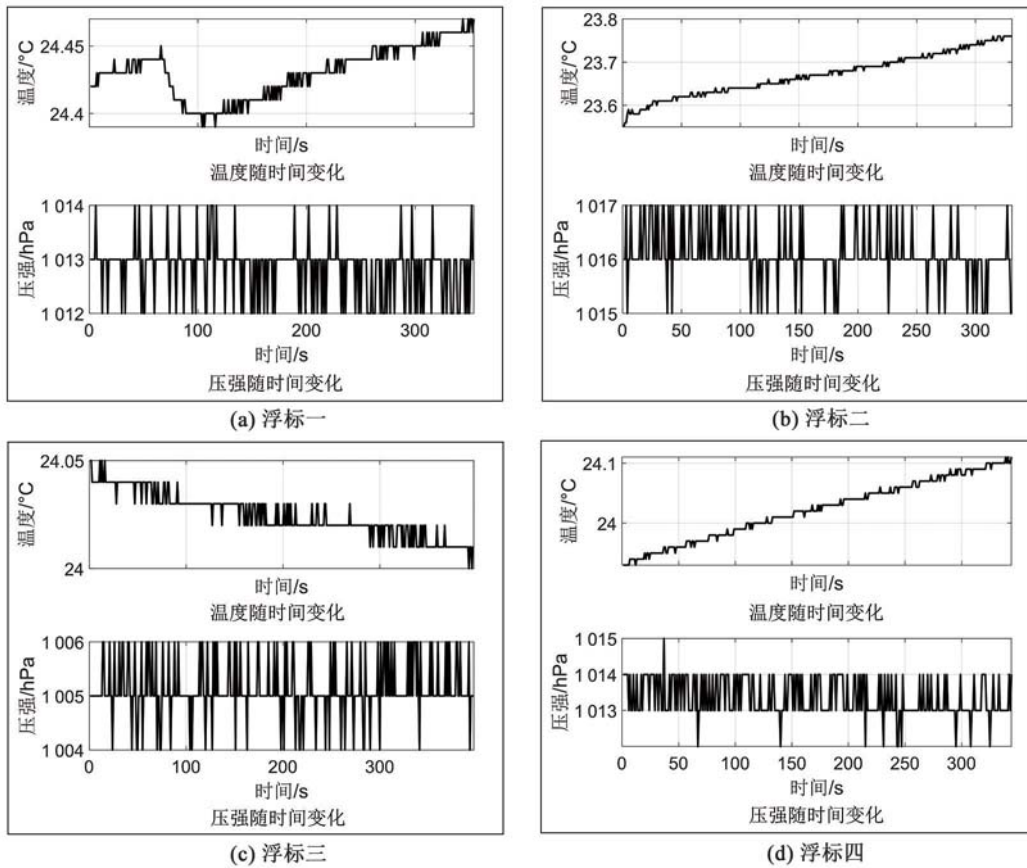


图8 二田湖实验浮标记录的温度压强变化曲线

Fig.8 Temperature and pressure curves recorded by the buoy at Er-Tian Lake

从软件采集数据界面与实验数据可知,4个浮标在组网状态下均保持稳定运行。本次试验中,所有漂流浮标通过AS32-TTL-100通讯模块与主机实现高可靠性信号互联,数据接收完整率达99.9%以上(丢包率<0.1%),传输过程连贯无中断。主机端接收程序全程运行正常,实时解析并存储了浮标传回的温度、压力等关键参数数据,验证了组网通信系统的鲁棒性与数据链路稳定性。

对所采集的数据开展快速傅里叶变换分析(fast Fourier transform, FFT),图9展示了4个浮标的温度与压强功率谱分布。四个浮标的温度功率谱密度均在频率值0.002 Hz附近呈现显著尖峰,随后随频率升高迅速衰减并趋近于0值。此结果表明温度信号以准稳态成分为主(对应周期约500 s),无明显周期性波动,数据稳定;且高频信号弱,噪声能量极低,数据信噪比优异。相交之下,压强功率谱密度在0~0.5 Hz内呈现多

峰振荡特征,整体噪声水平较温度数据高2个数量级,对信号的干扰作用不可忽略。这种频谱特征可能的原因:(1)测量时湖水表面存在波浪,引起实际水深周期性变化,产生噪声;(2)仪器随波运动的附加干扰;(3)水面风场与浮标的相互作用。针对此噪声干扰问题,通过时域预处理、巴特沃夫低通滤波以及小波阈值降噪等手段,可对噪声进行有效滤除。

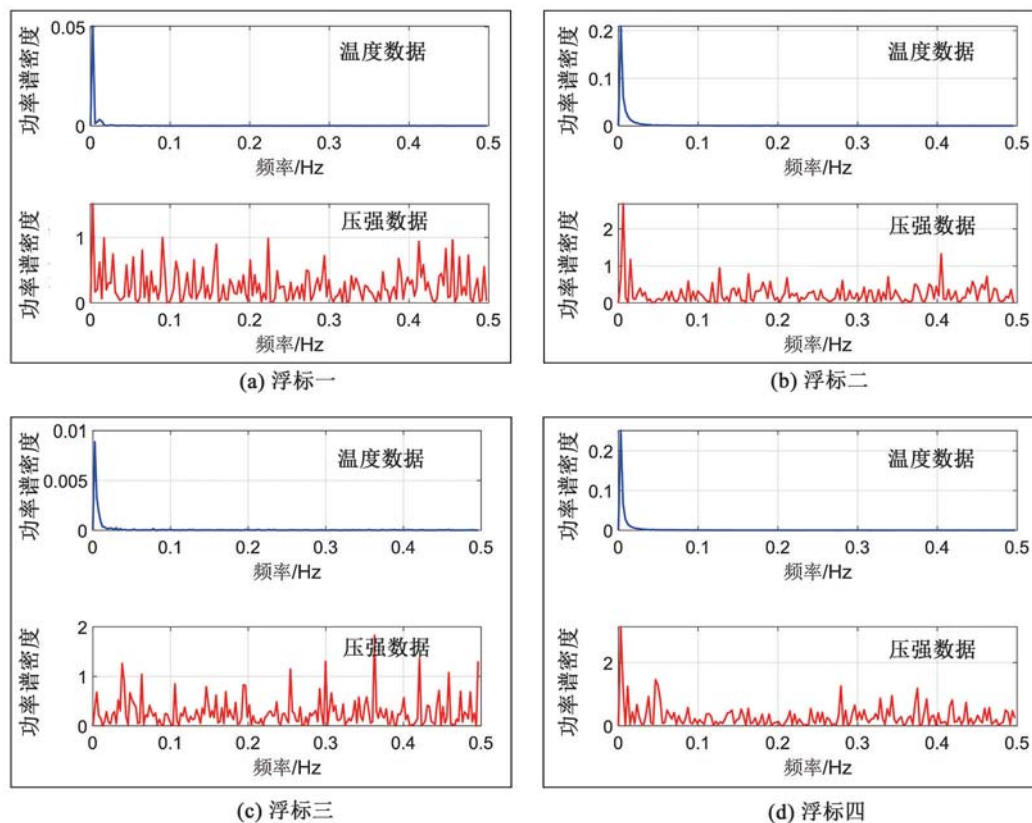


图9 四个浮标的温度与压强功率谱分布

Fig.9 Temperature and pressure power spectra of four drifting buoys

本实验实现了浮标间的通信联络和多浮标数据的实时回传至接收端计算机系统。后续计划将接收电脑的显示界面扩展至10个通道,以支持10个浮标的数据接收。目前接收界面为4个通道,从4个扩展到10个并无技术难度。

4 讨论与展望

本研究分析了海洋漂流浮标的整体结构,重点评估了其在数据采集与无线传输功能上的实现与性能。产品已连续3年应用于国防科技大学气象海洋学院毕业综合演练,学员们操作浮标进行海洋数据的采集和传输任务,为本浮标的迭代升级提供了大量宝贵经验。

尽管本研究在浮标设计与组网通信方面取得了一定进展,但仍存在一些需要深入探讨和解决的地方。一是长期可靠性与环境适应性测试不够。当前测试未能充分验证浮标在长期部署和真实海洋环境下的运行能力、传感器精度漂移以及能源系统的续航能力。二是组网规模较小。当前的组网实验验证了基本通信功能,但网络节点数量有限,尚未能充分研究在大规模浮标网络部署场景下,系统的组网性能、网络架构鲁棒性等课题。未来,本研究将开展真实环境下的长期海试验证,全面检验浮标性能。同步攻关大规模组网核心挑战,构建高适应、强协同的海洋观测网络。精确获取局部海域海气界面的温盐深数据,并依据现有的海洋学理论,对各种典型海洋现象进行精细化监测,进一步提高观测系统的整体性能。

(下转第85页)