

【引用格式】杨义军, 姚俊辉, 陈东升, 等. 极浅海域波浪滑翔器跨介质通信实验[J]. 数字海洋与水下攻防, 2022, 5(4): 307-312.

# 极浅海域波浪滑翔器跨介质通信实验

杨义军<sup>1, 3</sup>, 姚俊辉<sup>2, 3</sup>, 陈东升<sup>2, 3</sup>, 童 峰<sup>2, 3</sup>, 兰维瑶<sup>1</sup>

(1. 厦门大学 航空航天学院, 福建 厦门 361005;  
2. 厦门大学 海洋与地球学院, 福建 厦门 361005;  
3. 厦门大学 水声通信与海洋信息技术教育部重点实验室, 福建 厦门 361005)

**摘要** 面向海洋立体信息感知中长期环境监测、目标探测、区域预警、跨介质信息中继等领域对极浅海域空海信息链路的需求, 考虑极浅海域信道恶劣、潮流复杂、环境噪声严重等困难, 采用直接序列扩频结合差分二进制相移键控 (DS-DBPSK) 的水声调制解调技术, 以波浪滑翔器为平台进行水声通信、无线系统设计与整合, 构建面向极浅海域水下信息支持的波浪滑翔机跨介质通信链路, 并在平均深度 12 m 的厦门港海域开展极浅海域跨介质通信实验, 验证了所设计技术方案及系统的有效性。

**关键词** 波浪滑翔器; 跨介质通信; 实时通信

**中图分类号** TB56      **文献标识码** A      **文章编号** 2096-5753(2022)04-0307-06

**DOI** 10.19838/j.issn.2096-5753.2022.04.005

## Cross-medium Communication Experiment of Wave Glider in Extremely Shallow Sea

YANG Yijun<sup>1, 3</sup>, YAO Junhui<sup>2, 3</sup>, CHEN Dongsheng<sup>2, 3</sup>, TONG Feng<sup>2, 3</sup>, LAN Weiyao<sup>1</sup>

(1. School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China;  
2. College of Ocean and Earth Sciences, Xiamen University, Xiamen 361005, China;  
3. Key Laboratory of Underwater Acoustic Communication and Marine Information Technique of the Ministry of Education, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

**Abstract** Orienting the demand for air-sea information links in extremely shallow waters in the fields of medium- and long-term environmental monitoring, target detection, regional early warning and cross-media information relay in marine stereoscopic information perception, and considering the difficulties of poor acoustic channels, complex tidal currents and severe environmental noise in extremely shallow waters, the underwater acoustic modulation and demodulation technology of DS-DBPSK is adopted. Using the wave glider as the platform for the design and integration of underwater acoustic communication and wireless systems, the wave glider cross-media communication link for underwater information support in extremely shallow waters is built. The cross-media communication experiment in extremely shallow sea areas is carried out in the sea area of Xiamen Port with an average depth of 12m, and the effectiveness of the designed technical scheme and system has been verified.

**Key words** wave glider; cross-media communication; real-time communication

---

收稿日期: 2022-06-21

作者简介: 杨义军 (1998-), 男, 硕士生, 主要从事水声通信研究。

基金项目: 国家重点研发计划项目“面向海洋环境监测的信道感知水声传感网络”(2018YFE0110000); 中央高校基本科研业务费专项资金资助“基于动态块稀疏的分布式压缩感知水声稀疏信道估计”(20720210078)。

## 0 引言

由于海洋的资源和空间在国家经济社会发展中占有重要地位，在建设海洋强国的战略指导下，我国开展了大量的海洋探测设备研发。构建海天跨界质通信网络是保证国家海洋主权进行海洋资源勘探和开发的重要技术。

由于水和空气交界面的限制，跨介质数据传输是海洋研究的一大难关，构建水下设备和水上终端进行跨介质通信的海洋网络数据传输网络需要一种无人化、轻便化、隐蔽性强的设备作为网络中继节点。国内外研究团队都对该领域进行实验尝试，NOAA/PMEL 将 NeMONet 系统部署在东太平洋胡安德富卡脊沿岸距海岸 482.803 2 km、水深 1 500 m 处，该系统能够将科学数据从海洋深处通过浮标作为中继直接传输到陆地接收终端<sup>[1]</sup>。

法国的 YOYO 系统通过平台在 1 000 m 深度采集测量数据后传给水面浮标后通过卫星传回岸上基站<sup>[2]</sup>。中国科学院水声环境特性重点实验室设计了一种用于浅海水声通信的浮标，并与水下运动平台进行通信，在海上试验中，浮标无线通信距离达到 15.2 km，误码率不大于  $10^{-6}$ <sup>[3]</sup>。

2020 年 9 月中国船舶集团有限公司第七一〇研究所王海军课题组在海南进行基于“海鳐”波浪滑翔器的辅助通信网络海上应用实验<sup>[4]</sup>。

上述大多研究、实验都是基于浮标这一不可控制物体作为中继节点，位置不可实时依照需求进行改变。而实验的海域多在深海、开阔海洋开展，水深较深、水文条件较为稳定。

濒海、岛礁、码头港口、油气工程相关海域往往属于水深浅于 20 m 的极浅海域，这类极浅海域水深较浅，潮流、各类水下噪声复杂，而靠近海岸的极浅海域中上述环境因素造成的影响更加明显，对利用波浪滑翔器平台开展跨介质信息探测、感知、通信等工作造成极大挑战。

针对极浅海域特点以及波浪滑翔器的优势，本文基于波浪滑翔器进行水声、无线通信整合，在平均深度 12 m 的厦门港海域开展海试实验，并对实验结果进行分析，以此评估通信链路的可靠性，为

复杂浅海域跨介质通信系统研究提供参考。

## 1 浅海环境

浅海水声信道是一个时间-空间-频率变化、强多径干扰的信道。主要受以下几方面因素影响：首先，当声波在海水中传播时，随着传播距离的增加声波的能量会被海水吸收，且频率越高造成的损失越严重；其次，声波在传播过程中受边界条件（海面和海底）影响，在海面或者浅海海底会产生声射线的反射，造成声波在多条路径上传播，这一现象被称为多途效应。

由于不同路径的声波能量衰减不同，到达接收端的时间也不同，因此会使接收信号在时域上表现出波形混叠造成码间干扰，这一现象在浅海域中尤为突出。

海洋中的潮汐、波浪、船舶噪声等海洋环境噪声<sup>[5]</sup>的存在引起信号失真和信噪比降低对于水声通信的效果有着直接影响，在浅海环境下环境噪声高，且声波在海水中传输的损耗较大，使得接收信号的信噪比降低。低信噪比条件下不利于信号接收和解调。此外，由于海洋时变特性导致的海水介质变化和收发端之间相对运动产生的多普勒效应会使信号长度被压缩或拉长，同时导致信号的载频率发生偏移对解调产生影响<sup>[6]</sup>。

## 2 波浪滑翔器

波浪滑翔器是一种利用波浪动力来进行驱动的无人自主航行器，它能够充分吸收海洋中长期存在的波浪能源将其转换为前进动力，这种利用波浪能源产生动力的技术使无人航行器的无限续航成为可能。

波浪滑翔器主要由水面浮体平台、水下的“滑翔机”和连接这 2 部分的缆绳组成，如图 1 所示。水面浮体平台搭载控制单元、太阳能电池板、通信导航模块和各种传感器等<sup>[7]</sup>。太阳能电池板能够通过太阳能持续为波浪滑翔器上的设备进行供电；控制单元模块能够根据指令或是设定对搭载的仪器设备进行操控；北斗导航模块能够实时确定波浪滑翔器的位置，实现波浪滑翔器按预定路线自主航

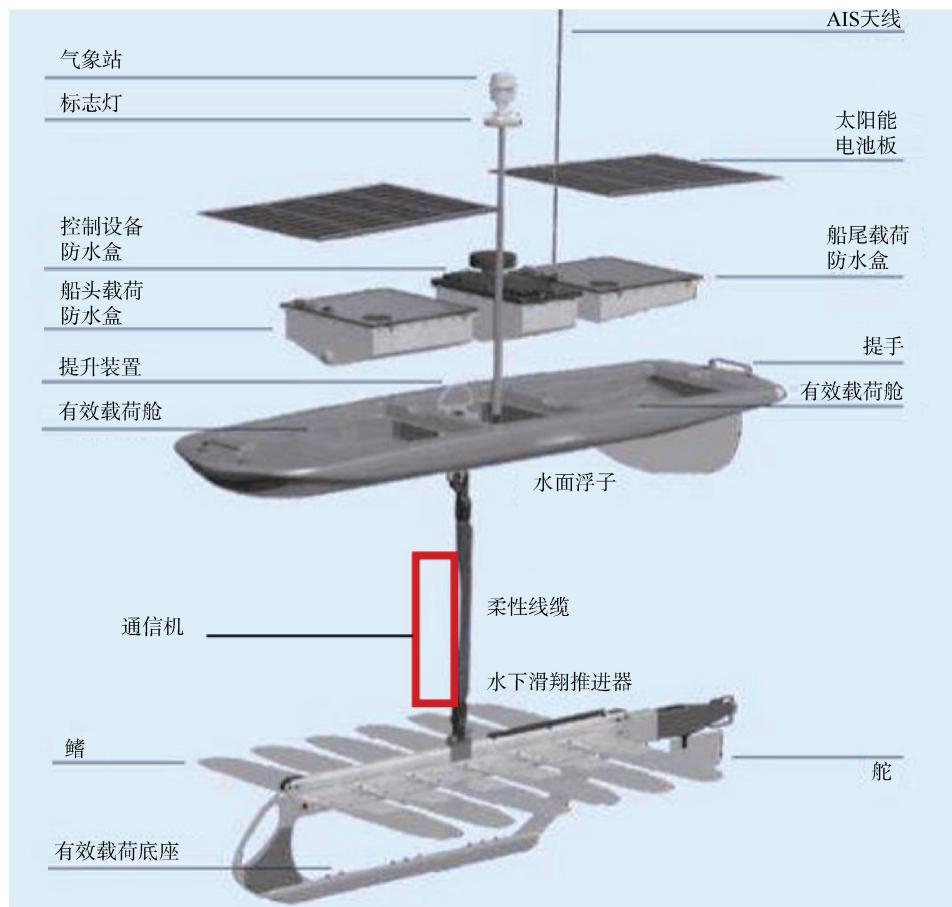


图 1 波浪滑翔器结构  
Fig. 1 Structure of wave glider

行; 无线通信模块如数传电台, 能够通过无线链路快速传递波浪滑翔器采集的信息或是接收控制指令实现在岸上进行远距离操控。

水下滑翔机由上下运动的水翼和尾部用于转向的舵机结构组成, 当水面浮体平台跟随波浪上下运动时就会通过缆绳带动水下“滑翔机”一起运动, 水下“滑翔机”的翼板在水的作用下上下翻转产生驱动整体向前运动的力, 而通过方向舵则可以控制整机的运动方向<sup>[8]</sup>。

### 3 水声通信机

考虑到浅海信道恶劣传输特性, 水声通信调制方式采用直接序列扩频结合 DBPSK 调制 (二进制差分相位键控调制) 其无需提取载波, 并且抗频漂、抗相位慢抖动能力强。

具体过程为原始信息进行差分编码后使用伪

随机码进行序列扩频, 经载波调制后得到发射序列  $s(t)$  如式 (1) 所示。

$$s(t) = b\left(\left\lfloor \frac{t}{T_b} \right\rfloor\right) c\left(\left\lfloor \frac{t}{T_c} \right\rfloor \bmod N\right) \cos(w_c t) \quad (1)$$

式中:  $b(t)$  为经差分编码后的信息序列;  $c(t)$  为伪随机序列;  $T_b$  是一个信息码元间隔时间;  $T_c$  是一个 PN 码元间隔时间;  $N$  是伪随机码位数; 符号  $\lfloor \bullet \rfloor$  表示向下取整。

接收端, 将带通滤波器输出的时域信号与本地扩频信息进行相关解扩后延迟一个码元与前面码元相乘进行解差分, 经判决后输出解调后的信息<sup>[6, 9]</sup>。

接收到的采样信号为

$$r(n) = b\left\lfloor \frac{n}{T_b \times F_s} \right\rfloor c\left\lfloor \frac{n}{T_c \times F_s} \right\rfloor \bmod N \cos\left(\frac{2\pi f_c}{F_s} n\right) \quad (2)$$

其中  $F_s$  为采样率, 本地信号为

$$S(n) = c \left( \left\lfloor \frac{n}{T_c \times F_s} \right\rfloor \bmod N \right) \cos \left( \frac{2\pi f_c}{F_s} n \right) \quad (3)$$

其与接收信号进行相关运算得到相关值  $COR(n)$  如下式所示：

$$COR(n) = \sum_{m=0}^{F_s T_b - 1} S(m) r(n+m) = \\ \sum_{m=0}^{F_s T_b - 1} c \left( \left\lfloor \frac{m}{T_c \times F_s} \right\rfloor \bmod N \right) \times \cos \left( \frac{2\pi f_c}{F_s} m \right) \times \\ b \left( \left\lfloor \frac{n+m}{T_b \times F_s} \right\rfloor \times c \left( \left\lfloor \frac{n+m}{T_c \times F_s} \right\rfloor \bmod N \right) \times \cos \left( \frac{2\pi f_c}{F_s} (n+m) \right) \right) \quad (4)$$

当  $n=F_s T_b k$  时, 上式可表示为

$$COR(n) = b_k R_1 R_2, n = F_s T_b k \quad (5)$$

式中,  $R_1 R_2$  为伪随机码和载波的自相关值。

由此可得到差分编码后的信息码  $b_k$ , 通过解差分、信道估计适配处理<sup>[10]</sup>并结合高效信道编码解码从而恢复原始信息。该技术方案结合扩频、信道估计适配、编码解码等手段, 从而改善复杂浅海域下的通信性能。

## 4 实验设置与结果分析

### 4.1 设备整合

波浪滑翔器搭载的水声通信机实物如图 2 所示, 其载频为 15.5 kHz, 通信速率 60 bps, 尺寸小, 便于进行波浪滑翔机平台整合, 能稳定工作。

前面对于波浪滑翔器、水声通信机和通信方式进行了简单的介绍, 阐明了波浪滑翔器这一无人自主航行器的水上浮体和水下驱动体的结构设计特点在进行水下和水上跨介质通信时的作为中继节点的应用优势。在通信方式上使用了直接序列扩频这一抗干扰能力强的调制技术, 并结合波浪滑翔机能耗的因素设计了低功耗的通信机, 整合后成为天海通信的中继节点, 配合波浪滑翔器上集成的无线通信模块和船上指挥控制终端以及船载甲板单元通信机进行通信, 实现无线电转水声, 水声转无线电的天海通信网络。后基于这一整套设备开展本次海试实验, 实验系统框图如图 3 所示。



图 2 水声通信机  
Fig. 2 Underwater acoustic communication machine

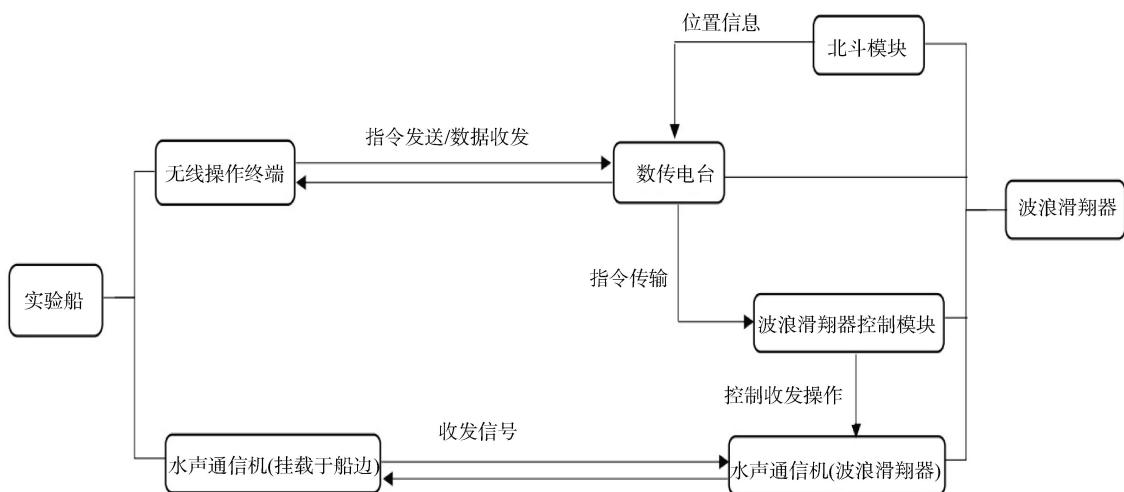


图3 实验系统框图  
Fig. 3 Block diagram of experimental system

#### 4.2 实验流程

实验海域为厦门港海域, 潮汐类型为典型的半日潮, 实验当天天气晴朗, 海面状况良好实验所处海域平均水深约 12 m。船载甲板单元通信机从船边布放于水深 3 m 处, 并在下方悬挂铅鱼以保证通信机水下姿态稳定。

与之前波浪滑翔器水声通信类似工作<sup>[4]</sup>不同, 本文设计的波浪滑翔器搭载水声通信机固定在波浪滑翔器脐带缆上如图 1 所示, 考虑到极浅海域如将水声通信机固定在水下滑翔体上有可能因水深过浅导致通信机与海底产生碰撞损坏通信机。

波浪滑翔器操控界面如图 4 所示, 通过操控终端进行相应操作, 以及观察波浪滑翔器的运动轨迹。在波浪滑翔器行进的过程中, 通过无线链路操纵集成在波浪滑翔器的水面浮体平台上的船载控制终端, 可通过波浪滑翔器搭载水声通信机与船载通信机甲板单位进行水声通信, 同时通过船载自容式水听器采集收到的信号。

实验船投放波浪滑翔器按照设定航线自主航行。波浪滑翔器移动过程中, 每隔一段时间就多次进行无线转水声、水声转无线的跨介质通信实验, 具体过程如下。

无线转水声: 由甲板无线操作终端向波浪滑翔器下达信号发送指令, 波浪滑翔器控制模块收到指令后控制水声通信机发送信号。实验船甲板单元通信机接收到信号后将接收数据传递到上位机。



图4 波浪滑翔器操作界面  
Fig. 4 Operation interface of wave glider

水声转无线: 操作人员通过上位机由甲板单元发送指令信号, 波浪滑翔器水声通信机接收到信号后进行处理, 处理结果经由数传电台反馈给甲板无线操作终端。

#### 4.3 实验数据分析

实验中水声通信接收信号如图 5 所示。上方为时域波形, 下方为时频图。实验中进行了 12 次水声通信, 每次实验时间约为 10 min, 声源信号级为 180 dB, 信噪比约为 15 dB, 最大通信距离 6 km, 实验过程中均实现无误码通信。

波浪滑翔机水声通信实验结果表明, 在波浪滑翔器运动过程中通信机之间相互通信可实现无误码效果。证明了扩频通信制式水声通信机在波浪滑翔器上使用的可行性, 验证了在极浅海域依托波浪滑翔机构建稳定水声无线跨介质链路的有效性。

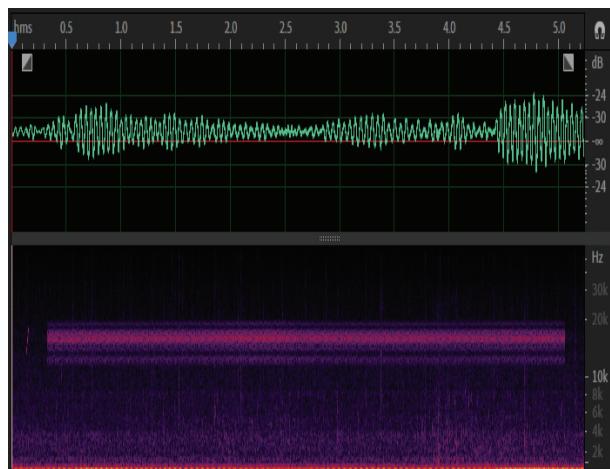


图 5 水声通信接收波形和时频图

Fig. 5 Diagram of underwater acoustic communication receiving waveform and time-frequency

## 5 结束语

在国家海洋强国战略下,提高海洋信息立体感知能力,为维护海洋权益、发展海洋经济、保护海洋生态提供信息支持,要求建立稳定可靠的跨介质海天通信链路。而水下收集的数据反馈到陆地接收端,需要把声学信号转换为空气中的电磁信号。目前大多以浮标等锚定设备作为跨介质<sup>[1-3, 11]</sup>通信节点,但是由于近岸极浅海域中人员密集,商业活动较多,海洋环境复杂,需要按照实际情况进行位置调整,如在港口布置通信节点时需要注意避开船只;当因信号受到物体遮挡时需要调整通信节点的位置以获得最佳接收信号。波浪滑翔器作为一种能实现长期续航和自主航行的新型无人航行器,能够长期在海上进行工作,在其上搭载水声通信机后即可构成移动通信节点,可根据应用需求和实际环境进行动态调整。因此基于波浪滑翔器平台的跨介质通信链路有良好的应用前景。

本文针对极浅海域水声信道复杂的情况,采用扩频体制水声通信机依托波浪滑翔器平台与其本身集成的无线通信模块进行结合,构成跨介质海天通信链路节点,并在厦门港极浅海域进行跨介质海试实验,验证了系统有效性。本文工作可对极浅海域海天跨介质通信网络构建提供参考。

## 参考文献

- [1] STALIN S E, MILBURN H B, MEINIG C. NeMONet: a near real-time deep ocean observatory[C]// OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition. US: IEEE, 2000.
- [2] CERDA V. Smart sensors for real-time water quality monitoring[M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2014.
- [3] 周建清, 郭中源, 贾宁, 等. 无线/水声通信浮标技术研究及其实现[J]. 应用声学, 2012, 31(6): 445-455.
- [4] 王海军, 宋帅, 吴小涛, 等.“海蟠”波浪滑翔器在水下定位与通信中的应用[J]. 数字海洋与水下攻防, 2021, 4(6): 498-505.
- [5] 杨志国, 姜莹, 刘保华, 等. 波浪滑翔器声学应用分析[J]. 声学技术, 2021, 40(2): 174-180.
- [6] 王小阳. 微小型 AUV 水声通信技术及其实现研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2019.
- [7] 郑皆倞, 孙文秋实, 李超. 海上无人波浪滑翔机的应用与发展[J]. 科技导报, 2020, 38(21): 134-143.
- [8] 李小涛, 王理, 吴小涛, 等. 波浪滑翔器原理和总体设计[J]. 四川兵工学报, 2013, 34(12): 128-131.
- [9] 王潜, 颜国雄, 童峰. 一种浅海信道扩频水声调制解调系统及其 DSP 实现[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2009, 48(4): 532-537.
- [10] 周跃海, 曹秀岭, 吴燕艺, 等. 时变信道下的被动时间反转扩频水声通信[J]. 应用声学, 2015, 34(6): 509-515.
- [11] 周建清, 郭中源, 贾宁, 等. 无线/水声通信浮标技术研究及其实现[J]. 应用声学, 2012, 31(6): 445-455.

(责任编辑: 肖楚楚)