

一种水下声学探测浮标的设计与实现

谌启伟

(中国船舶重工集团有限公司第七一〇研究所, 湖北 宜昌 443003)

摘要 介绍了一种水下声学探测浮标的设计及实现。该浮标基于国产北斗 Argo 浮标搭载水声探测载荷, 能够在水中自主沉浮, 并实现对水声通信信号探测, 发现目标后, 通过北斗卫星传输目标的相关特征信息。该浮标能够实现设备程控沉浮、自我定位、卫星通信、水声信号检测识别、数据记录、信息显示等功能。可广泛用于重要航道、演习区域等海域的水下安全排查, 掌握水声通信网络布设及分布情况, 为我重要军事行动提供决策依据。

关键词 浮标; 声探测; 海洋技术装备

中图分类号 P715.5

文献标识码 A

文章编号 2096-5753-(2020)01-0046-06

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2020.01.009

Design and Implementation of an Underwater Acoustic Detection Buoy

CHEN Qiwei

(No.710 R&D Institute, CSIC, Yichang 443003, China)

Abstract The design and implementation of an underwater acoustic detection buoy is introduced. The buoy is based on Argo buoy of Beidou system, which carries underwater acoustic detection load, can sink and float independently in water, and can detect underwater acoustic communication signals. After discovering the target, it transmits the relevant characteristic information of the target through Beidou satellite. It can realize the functions of programmable floating, self-positioning, satellite communication, underwater acoustic signal detection and recognition, data recording, information display, etc. It can be widely used in underwater safety investigation of important waterways, exercise areas, etc. It can obtain the layout and distribution information of underwater acoustic communication network, and provide decision-making basis for important military operations of our forces.

Key words buoy; acoustic detection; marine technical equipment

0 引言

近年来, 日、美等国为了实现对第一岛链附近海域的有效监控, 防止中国海军突破岛链, 建立起了一套复杂的水面、水下情报监测网。该情报监测网通过无缆的水声网络进行监测, 探测重点是大陆的潜艇及各型水面舰艇的电磁特征和通信信号^[1]。为了改变水下探测力量严重不对称的现状, 需要大

力发展对水声通信网络及其节点进行探测发现的便携式装备, 在已有情报的指导下, 对关键水道等重点区域进行筛查, 找出敌水下探测网的具体布设位置, 以便干扰、破坏其网络, 确保为我潜艇出航安全^[2]。因此本文设计了一种基于国产北斗 Argo 浮标, 搭载水声探测载荷的水下声学探测浮标, 能够进行快速部署并有效监测水声通信网络布设及分布情况。

1 系统设计

水下声学探测浮标主要由自沉浮浮标平台、四阵元声基阵、姿态及方位测量单元等组成，如图 1 所示。浮标平台用于搭载四阵元声基阵、姿态及方位测量单元；四阵元声基阵用于测量可疑目标相对于浮标平台的方位和距离估算，并记录水声通信信号样本信息；姿态及方位测量单元用于检测浮标

平台的姿态和相对于地磁场的方向^[3-4]。监控中心用于接收探测数据并显示探测结果。

根据使用需求，浮标可以采用定深漂流探测和原位探测 2 种工作模式，对水下声通信信号进行探测，记录水声通信信号样本。探测到目标后，通过北斗卫星将相关探测信息数据发往监控中心。其典型工作模式如图 1 所示。

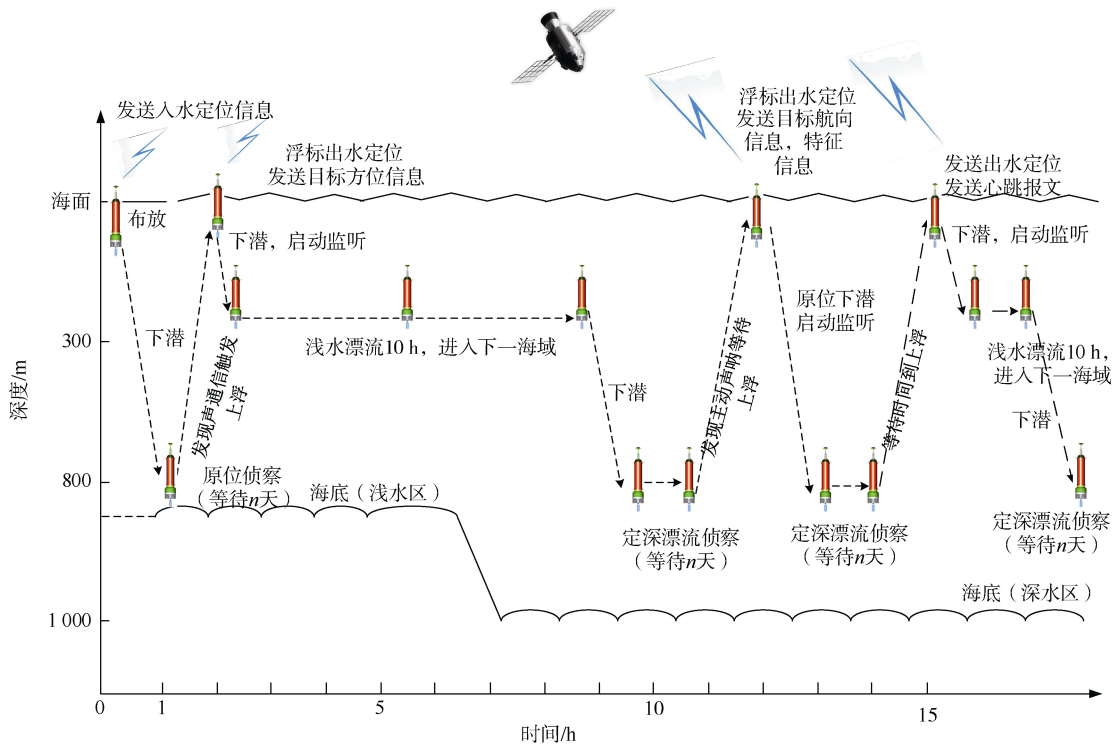


图 1 探测浮标典型工作模式示意图
Fig. 1 Schematic diagram of detection buoy in typical operation modes

浮标在水下设定深度漂流探测或原位探测，通过声基阵探测水下声通信信号频带。探测到水下声通信信号后，立即启动记录声通信信号样本，并通过声基阵对目标进行距离估算，计算目标相对于浮标的方位。浮标上安装有姿态及方位测量单元，与声基阵的相对位置固定，通过检测到的浮标航向和水声测量数据，浮标自动解算可疑目标的地磁方向。对目标进行距离估算并定向后，浮标上浮，上浮过程中保持探测状态。上浮至水面后，浮标控制模块将出水 GPS 坐标发送给声学信号处理器，同时发送询问指令给声学信号处理器，要求将声学测

量相关特征信息传送给浮标的控制模块。浮标控制模块接收完相关声学测量信息后，通过卫星将相关信息（包括当前浮标坐标、目标方位、相对估算距离、时间、信号持续时间、信号是否停止、探测信号中心频率、信号频带宽度、平均声压级、信噪比）发往监控中心。卫星通信结束后，浮标接收监控中心指令，按照设定的工作模式继续探测。若在设定工作时间周期内，浮标未探测到可疑声通信信号，浮标上浮出水，发送心跳报文至监控中心后，下潜到一定深度漂流到下一探测区域，根据使用需求采用合适的工作模式继续探测^[5-6]。如图 2。

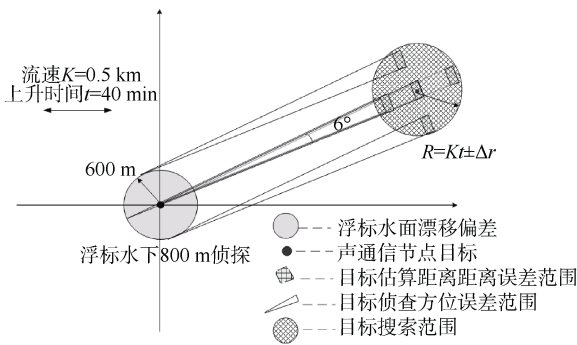


图 2 目标探测原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the target detection

2 自沉浮浮标平台

浮标平台主要由 5 个部分组成，包括：壳体模块、浮力调节模块、控制模块、通信采集模块、电源模块。浮标平台组成框图如图 3 所示。壳体模块主要用来承受外部水压，保证设备密封耐压；浮力调节模块主要用于调节浮标浮力；控制模块用于控制液压装置、采集深度信息、控制浮标漂流深度、与声基阵通信、系统电源管理；通信模块用于北斗卫星通信定位；电源模块用于系统供电。

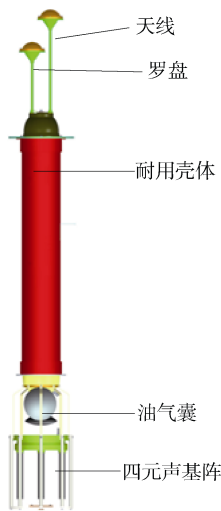


图 3 浮标平台结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of structure of the buoy platform

3 声学探测模块设计

声学探测模块由四元声基阵、放大滤波预处理

电路、信号采集电路、信号处理单元和通信供电接口等组成，其组成框图如图 4 所示。声基阵由 4 个水听器组成，安装在模块底部。4 个水听器阵元处于一个水平面内，构成正方形阵。其余电子部分置于水密电子舱内，电子舱通过水密电缆与模块主体相连，实现声学探测模块的供电及与平台之间的数据通信^[7]。

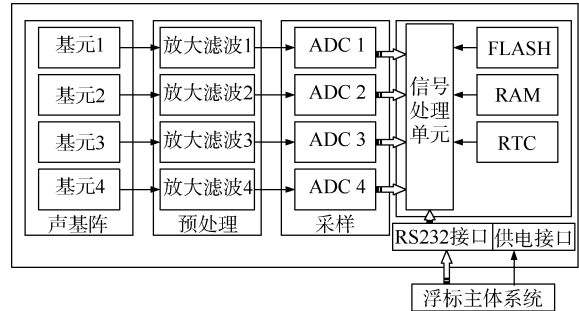


图 4 声学探测模块组成框图

Fig. 4 Composition diagram of acoustic detection module

系统通过 4 个十字正交的水听器实现声学信号到电信号的转换，对接收到的信号进行放大滤波等预处理，通过数字采集电路完成模拟信号到数字信号的转换，通过信号处理单元实现有用信号检测、信号参数估计、目标方位估计及作用距离估算等，将信号检测和参数估计等结果输出给浮标平台^[8]。

1) 信号检测方法。

声学探测模块信号检测技术采用传统的能量检测方法。由于待检测的信号是主动声呐信号或水声通信信号，这 2 种信号的脉宽都比较长，时域的扩展引起频域的聚集，因此本系统采用的是频域能量检测的方法。即先对信号进行频谱计算，然后判断工作频段内是否存在过门限的幅度谱，存在即判断为有信号，然后再对有用信号进行信号参数估计。由于系统的工作频段比较宽，而在该频段内海洋环境噪声的幅度谱起伏比较大，特别是在低频时起伏更大，如果是对全频段内的噪声信号进行检测的话，则可能丢失高频信号，因此不能用单一的门限在整个频带范围内进行信号检测。本系统采用倍

频程的频带划分方法,将系统的整个工作频带划分成若干个子频带,在每个子频带内分别进行门限计算并进行信号检测。

2) 信号参数估计方法。

由于是在频域进行信号检测,因此信号的中心频率、带宽、等效声源级和信噪比均可结合信号检测的过程进行估计。在每一帧当中,不进行信号脉宽计算,仅根据连续过门限的帧数和帧长度计算信号的脉宽。根据信号的带宽进行信号来源判断,当信号带宽超过 1.5 kHz 时,即认为是通信信号。

3) 目标方位估计方法。

设基阵的 4 个阵元构成的左手直角坐标系为基阵坐标系,其中 1 号和 3 号阵元在 x 轴上,2 号和 4 号阵元在 y 轴上,阵的中心为坐标原点,阵元间距为 D (指 1、3 阵元间距和 2、4 阵元间距),如图 5 所示。设目标位于 S 处,其在基阵坐标系下的坐标为 (x, y, z) 。目标径矢为 OS , α 为目标径矢与 x 轴的夹角, β 为目标径矢与 y 轴的夹角, R 为目标斜距。

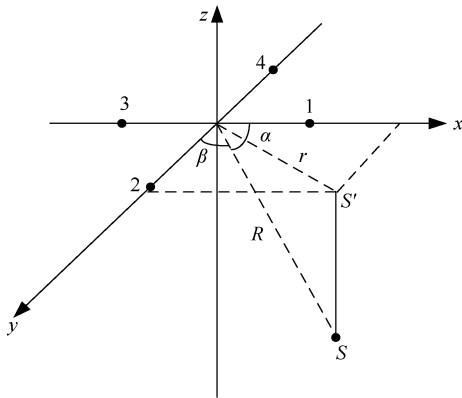


图 5 目标方位估计原理示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the target bearing estimation

设 S' 为 S 在 xoy 平面上的投影,它与 x 轴的夹角 θ 为目标水平方位角,可得:

$$\theta = \operatorname{tg}^{-1} \frac{y}{x} = \operatorname{tg}^{-1} \frac{\cos \beta}{\cos \alpha} \quad (1)$$

式中, α 、 β 和 R 为测量值,测得这 3 个值即可按上式计算目标的方位参数。基阵的尺寸很小,在平面波近似下,有:

$$\tau_x = \frac{D \cos \alpha}{c} \quad (2)$$

$$\tau_y = \frac{D \cos \beta}{c} \quad (3)$$

式中: c 为水中声速; τ_x 为 x 轴两阵元接收信号时延差; τ_y 为 y 轴两阵元接收信号时延差。将式 (2) 和式 (3) 代入式 (1), 得到:

$$\theta = \operatorname{tg}^{-1} \frac{\tau_y}{\tau_x} \quad (4)$$

式 (4) 为基阵坐标系下的目标方位估计公式。由此可见,要得到目标方位需要先测量信号到达两阵元之间的时延差,目标方位估计精度取决于时延差估计误差。根据基阵坐标系与“北东天”大地坐标系之间的方位姿态偏差角,通过坐标转换可以获得目标在大地坐标系下的方位。

4) 时延差估计方法。

本系统的时延差估计方法采用广义相关法,空间分离的 2 个水听器接收到远处声源的辐射信号,可以用以下数学模型来描述:

$$\begin{cases} x_1(t) = s(t) + n_1(t) \\ x_2(t) = s(t - \tau) + n_2(t) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $s(t)$ 为声源辐射的信号; $n_1(t)$ 和 $n_2(t)$ 为互不相关的、平稳的高斯随机过程; τ 为两路接收信号间的相对时延,简称为时延差。

时延差估计可归结为是式 (5) 中 τ 的求取。由于 $n_1(t)$ 、 $n_2(t)$ 的存在以及处理过程中所引入的偏差,实际上只能得到 τ 的估计量 $\hat{\tau}$ 。一种基本的估计方法是计算 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 的互相关函数:

$$R_{x_1 x_2}(\tau) = E[x_1(t)x_2(t - \tau)] \quad (6)$$

由于 $s(t)$ 和 $s(t - \tau)$ 是相关的,而背景噪声 $n_1(t)$ 和 $n_2(t)$ 是不相关的 (或相关性较小的),因此互相关处理后包络峰值对应的 τ 就是时延差的估计量 $\hat{\tau}$ 。为提高 $\hat{\tau}$ 的估计精度,在互相关处理前还可以分别对 $x_1(t)$ 、 $x_2(t)$ 进行预滤波处理。

4 仿真及试验结果

1) 作用距离分析。

目标在不同距离处时水声模块接收机输出端的信号电压级和背景噪声等效电压级如图 6 所示,

其中细实线曲线代表接收机输出端的信号电压级（已经由接收到的声压级转换为电压级），粗实线代表接收机输出端的背景噪声电压级。系统假设水声通信信号声源级为 180 dB，由图中结果可看出，在 5 km 处的接收信噪比约为 12 dB。主动声呐信号声源级很高，通常超过 230 dB，系统将在更远距离上（大于 40 km）予以探测。本文仿真条件以水声通信信号为输入样本，因此目标参数估计误差分析均基于接收信噪比为 12 dB。

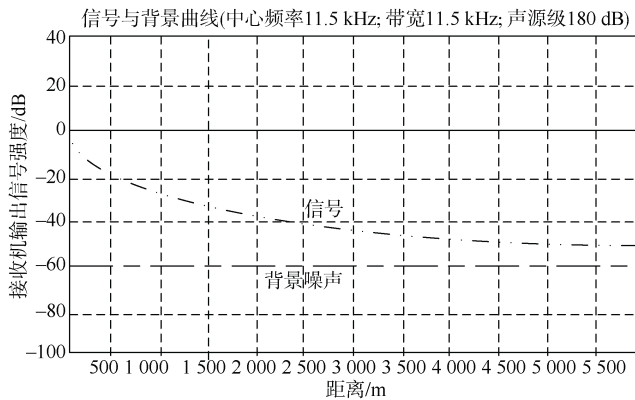


图 6 作用距离预报曲线
Fig. 6 Forecast curve of operating distance

2) 时延差估计误差分析。

最优时延差估计的克拉美罗下限为

$$\sigma^2 \geq \frac{3 \left(1 + 2 \times \frac{S}{N} \right)}{8\pi^2 \times B^3 \times T \times \left(\frac{S}{N} \right)^2} \quad (7)$$

式中： B 为信号带宽，Hz； T 为观测时间，s； S/N 为接收信噪比，dB。设定信号带宽为 5 kHz，观测时间 T 为 10 ms，接收信噪比为 12 dB，可求得时延差估计的克拉美罗下限为 $\sigma^2 \geq 5.277 \times 10^{12}$ ，则时延差估计误差满足 $\Delta\tau \geq 2.3 \times 10^{-6}$ s。实际系统中，基于互相关峰值检测的时延差估计误差要大于克拉美罗下限。结合已有项目实践经验，取时延差估计误差为 5 μ s 进行目标方位估计误差分析。

3) 目标方位估计误差分析。

由式 (4) 可得到： $\tan \theta = \frac{\tau_y}{\tau_x}$ ，对上式等号两

边分别求全微分得到

$$\frac{1}{\cos^2 \theta} \cdot \Delta\theta = \sqrt{\left(\frac{1}{\tau_x} \Delta\tau \right)^2 + \left(\frac{\tau_y}{\tau_x^2} \Delta\tau \right)^2} \quad (8)$$

在不考虑声速误差和阵元间距误差的情况下，整理上述式子得到目标方位估计误差公式为

$$\Delta\theta = \sqrt{\left(\frac{1}{\tau_x} \Delta\tau \right)^2 + \left(\frac{\tau_y}{\tau_x} \Delta\tau \right)^2} \cdot \cos^2 \theta = \frac{c \cdot \cos \theta}{D \cdot \cos \beta} \cdot \Delta\tau \quad (9)$$

当时延差估计误差 $\Delta\tau = 5 \mu$ s，声速 $c = 1500$ m/s， $\theta = 90^\circ$ ， $\beta = 45^\circ$ 时，若要满足 $\Delta\theta \leq 5^\circ$ ，则阵元间距需满足： $D \geq 0.122$ m。考虑预留余量，本系统中的阵元间距取 0.15 m。

图 7 给出了方位角为 40° 情况下的目标方位多次仿真结果。具体的仿真参数为：信号为 9~14 kHz 的线性调频信号，信噪比为 12 dB， $C = 1480$ m/s， $D = 0.15$ m。由图中结果可看出，在上述的仿真条件下，目标方位估计误差小于 5° 。

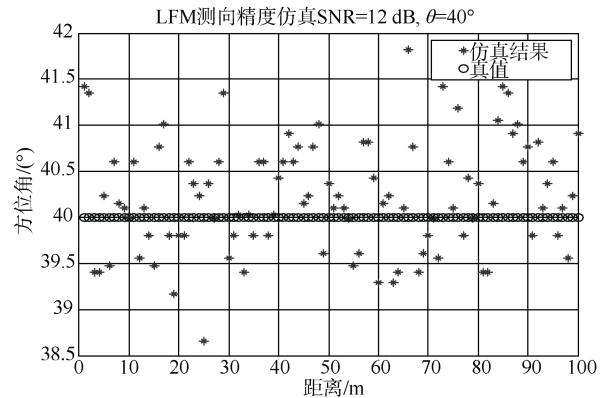


图 7 方位估计误差仿真结果
Fig. 7 Simulation result of target bearing estimation

4) 海上试验。

为验证浮标功能及指标的有效性，开展了相关的湖上及海上验证试验。试验通过使用模拟信号源，模拟输出多类型水声通信信号，经功率放大器放大后输出至换能器，使用船载移动声源，浮标锚系上浮方式，测试不同方位、不同距离发射时，浮标触发上浮报警的性能指标摸底，试验设备关系如图 8 所示。

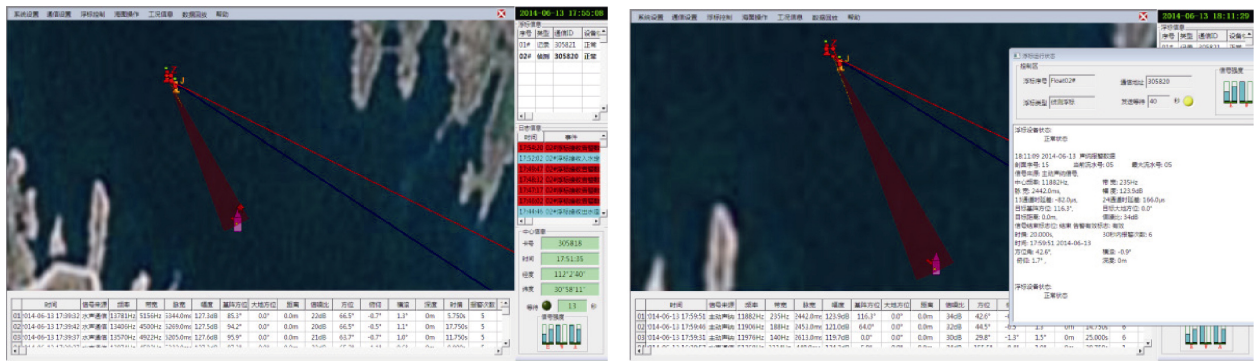


图 8 试验结果

Fig. 8 Test result of the target detection

试验表明,该浮标能够准确探测到各类型水声通信信号和主动声呐信号,相关声信号的特征值亦可获取,并能够初步测量目标方位,方位误差不超过 5°。试验中拉距测试过程,最大探测距离超过 6 km。

5 结束语

本文介绍了一种水下声学探测浮标的设计及实现,该浮标基于 Argo 浮标搭载水声探测载荷,能够在水中自主沉浮,并实现对水声通信信号的探测,发现目标后能通过北斗卫星传输目标的相关特征信息。通过仿真试验和湖试、海试,验证了水声测量模块的测向功能和测向指标,以及浮标系统样机全部功能要求。该浮标在探测距离、检测概率指标上满足或超过设计要求,可提供水声通信网络布设及分布情况,为我重要军事行动提供决策依据。

参考文献

- [1] 孙明太. 航空反潜概论[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
- [2] 尹晓东, 刘清宇, 徐江. 国外航空声学探潜装备研究进展[J]. 舰船科学技术, 2008, 30 (6): 172-175.
- [3] 凌国民, 王泽民. 声呐浮标技术及其发展方向[J]. 声学与电子工程, 2007 (3): 1-3.
- [4] 刘伯胜, 雷家煜. 水声学原理[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 1993: 5-10.
- [5] 艾特. 水声建模与仿真[M]. 蔡志明, 译. 北京: 电子工业出版社, 2005: 120-143.
- [6] 谢振华, 李林, 程江涛. 圆形浮标阵搜潜效能评估研究[J]. 舰船电子工程, 2011, 31 (12): 168-170.
- [7] 李启虎. 声呐信号处理引论[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [8] 孙国振, 董真杰, 连丽婷. 多浮标定位系统最优布站分析[J]. 声学技术, 2013, 32 (6): 477-480.

(责任编辑: 张曼莉)