

DOI: 10.13382/j.jemi.B2508459

小型水下探测平台舷侧阵声纳系统设计*

卢健 郭世旭 焦君圣 完颜明浩 赵鹏

(中国计量大学原位计量教育部重点实验室 杭州 310018)

摘要:为提升水下平台对目标的探测精度,设计并验证了一套布设于载体舷侧的声纳系统。系统由水听器阵列及电子系统组成,并工作在被动声纳模式。采用相移波束形成技术对接收信号进行空域处理以估计目标方位角,利用匹配滤波技术对回波信号进行处理以估计目标距离;电子系统部分采用低噪声信号调理及同步采集模块,实现对48通道声学信号的低噪声同步捕获,并设计了高速大容量存储系统保障数据的实时记录。实验结果表明,电子系统自噪声谱级低至 $2.52\text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ @ 40 kHz,系统整体幅度一致性误差小于3 dB,相位一致性误差低于 6° 。系统具备 2.10° 和1.35 m的分辨能力,以及 3.96° 和2.12%的定位误差。

关键词: 舷侧阵声纳;相移波束形成;匹配滤波;水下平台;目标探测

中图分类号: TP274;TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 140.2050

Flank array sonar system design for compact underwater exploration platforms

Lu Jian Guo Shixu Jiao Junsheng Wanyan Minghao Zhao Peng

(Key Laboratory of In Situ Metrology Ministry of Education, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: To enhance the detection accuracy of underwater platforms for targets, this paper designs and validates a sonar system mounted on the flank side. The system omprises a hytrophone array and an electronic subsystem, operating in passive sonar mode. System employs phase-shifted beamforming technology to process received signals in the spatial domain for target azimuth estimation, and utilizes matched filter technology to process echo signals for target range estimation. The electronic subsystem incorporates low-noise signal conditioning and synchronous acquisition modules to achieve low-noise synchronous capture of 48-channel acoustic signals, and features a high-speed, large-capacity storage system to ensure real-time data recording. Experimental results demonstrate that the electronic system self-noise spectral density is as low as $2.52\text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ @ 40 kHz, with inter-channel amplitude consistency error below 0.4 dB and phase consistency error under 2° . The system exhibits an overall amplitude consistency error of better than 3 dB and a phase consistency error of below 6° . It is capable of achieving a resolution of 2.10° and 1.35 meters, with a localization error of 3.96° and 2.12%.

Keywords: flank array sonar; phase-shifted beamforming; matched filter; underwater platform; target detection

0 引言

随着水听器及其阵列结构的创新,水下目标探测技术得到持续发展^[1-2]。基于单水听器的目标探测技术,常利用运动产生的多普勒频偏实现目标识别,孙大军等^[3]提出了一种基于自适应最小均方算法的目标探测方法能

够精确估计小目标方位并具备较强的抗干扰能力。尹涵等^[4]针对小型水下平台,利用强化学习算法,实现对水下目标方位的高效解算,孟欣怡^[5]、宋鹏飞^[6]利用海洋声场特性,实现了单水听器对目标的被动测距。为克服单水听器探测的局限性,多基元水听器阵列的应用日益广泛^[7-8]。陈筱月等^[9]提出一种基于混合1范数的拖曳线列阵海底目标探测方法,显著提升了探测精度,杨刚

等^[10]提出一种基于反卷积技术的线列阵信号处理算法,可实现多个目标的同时探测。然而,拖曳线列阵通常挂载于船尾,易受拖船噪声干扰导致接收阵列中出现伪目标^[11]。对此,陈新华等^[12]提出了一种基于频率特征分析伪目标判别方法,判别准确率超过95%,有效降低了伪目标的影响。除线列阵外,其他阵列结构的研究也取得一定进展。石娟等^[13]提出了一种适用于水下滑翔机的A字型阵列结构,实现较高精度的目标定位。左震^[14]则提出一种基于艇载侧扫声纳的目标探测方法,能够有效定位水底目标。

尽管阵列技术可提升水下目标的探测能力^[15-16],但对于诸多体积小、机动性强的水下探测平台(如水下无人潜航器、水下滑翔机等),传统的拖曳式阵列难以满足平台的高机动性要求;而利用艇首或局部安装小尺度声基阵时,又面临探测距离有限、定位精度不足等挑战。在此背景下,舷侧阵声纳系统成为一种颇具潜力的解决方案。通过沿平台两舷壳体布设水听器阵列,可在保持平台原有动力学特性的前提下,将有效声学孔径扩展至接近载体全长,显著提升对水下目标的探测能力。

本文根据某水下高速平台的需求,详细设计了一套舷侧阵声纳系统的水听器阵列以及电子系统,并在湖上进行了原理样机声波首发信号测试以及测距测向试验验证。

1 水听器阵列设计

1.1 阵列测向原理

舷侧阵声纳的声基阵可看作均匀线列阵(uniform linear array, ULA)^[17], N 个接收灵敏度相同的阵元沿直线以间距 d 等间距排列,如图1所示。

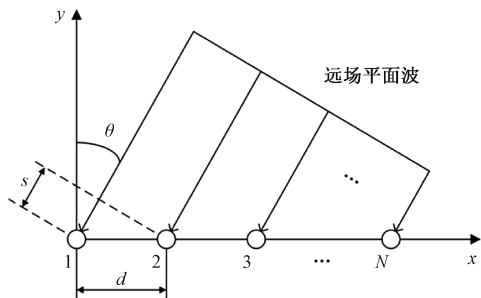


图1 均匀线列阵结构

Fig. 1 Schematic diagram of uniform linear array

声基阵尺寸通常远大于声信号波长,导致各阵元接收到的声信号存在相位差。通过对各阵元输出信号进行移相、求和等处理,基阵的总输出会随入射声波方位角变化而改变,从而使声基阵具备指向性。该过程称为声纳的波束形成(beamforming)^[18]。

假设声源、阵列、目标位于同一平面,且目标距离阵列距离足够远,此时目标的回波信号可看作远场平面波^[19]。设回波信号为频率 f 的单频正弦信号,其波长为 λ ,入射角为 θ , c 为水中声速, τ 为平面波到达相邻阵元的时间差,则相邻阵元所接收信号的相位差为:

$$\varphi = 2\pi f\tau = 2\pi f \frac{d}{c} \sin\theta = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin\theta \quad (1)$$

以第1阵元作为参考点,第 n 个阵元与参考点的相位差为 $(n-1)\varphi$,其输出信号可表示为:

$$F_n(\varphi, t) = A \cos[\omega t + (n-1)\varphi] = A \operatorname{Re}[e^{j\omega t} \times e^{j(n-1)\varphi}] \quad (2)$$

对阵列的 n 个阵元的输出信号进行求和,阵列的输出信号 $S(\varphi, t)$ 可表示为:

$$S(\varphi, t) = \sum_{n=1}^N F_n(\varphi, t) = A \times \operatorname{Re}\left[e^{j\omega t} \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)\varphi}\right] \quad (3)$$

式中: N 为阵元个数。式(3)归一化处理,其模即为阵列指向性函数:

$$D(\theta) = \left| \frac{\sin(N\pi d \sin\theta / \lambda)}{N \sin(\pi d \sin\theta / \lambda)} \right| \quad (4)$$

当回波信号入射角 $\theta=0^\circ$ 时,各阵元的输出信号同相叠加,此时有 $D(0)=1$,表明阵列在该方向上的增益最大,称该方向为阵列指向方位。

在式(4)中引入相移因子,可实现对阵列指向方位的调控,经相移处理后的指向性函数如式(5)所示。

$$D(\theta) = \left| \frac{\sin(N\pi d (\sin\theta - \sin\theta_0) / \lambda)}{N \sin(\pi d (\sin\theta - \sin\theta_0) / \lambda)} \right| \quad (5)$$

式中: θ_0 为指定的阵列指向方位。当其指向目标方向时,各阵元的回波信号同相叠加,阵列有最大的输出幅值,实现对目标方位的测量。

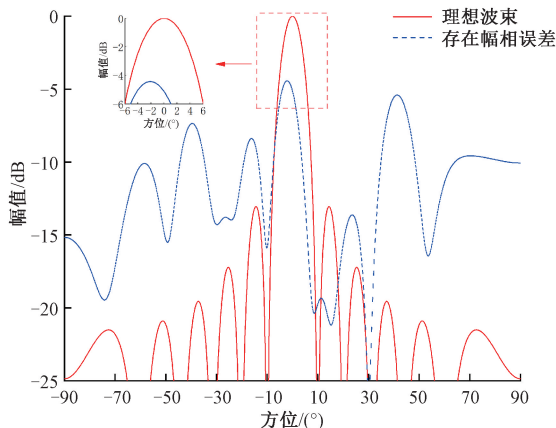


图2 存在幅相误差的波束形成

Fig. 2 Beamforming with phase and amplitude errors

系统中各通道间的幅相误差会降低波束形成性能,影响目标定位精度。幅度误差主要导致信号旁瓣电平抬

高;而相位误差除影响旁瓣外,还会显著改变主瓣的指向特性。

图2所示为存在幅相误差时的12元阵波束形成,其中,信号频率40 kHz,幅度误差为 ± 3 dB,相位误差为 $\pm 5^\circ$ 。与理想波束相比,存在幅相误差的波束主瓣指向偏移 2° ,旁瓣电平抬高10 dB。为提高系统定位精度并综合考虑实际研制难度,系统整体的幅度与相位误差范围分别设定为 ± 3 dB及 $\pm 6^\circ$ 以内。

1.2 阵列测距原理

声纳测距利用发射脉冲信号和接收回波信号之间的时间差 t 实现^[20]。由于环境噪声影响,不能直接从回波信号中读取到达时刻。

采用匹配滤波技术,对采集到的声学信号进行处理,获得声纳信号的接收时刻,解算出目标距离 R ,信号处理链路如图3所示。

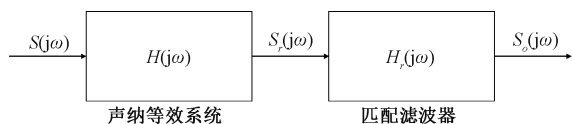


图3 信号处理链路

Fig. 3 Signal processing flow

声纳与目标构成一个线性时不变系统(linear time invariant, LTI),该系统的冲激响应为:

$$h(t) = \sigma \delta(t - \tau) \quad (6)$$

式中: σ 为目标的散射系数,反映目标对发射信号的散射能力; τ 为声波在声纳与目标间往返一次的时间。

根据LTI系统特性,回波信号的频谱可表示为发射信号频谱与系统频率响应的乘积,即:

$$S_r(j\omega) = S(j\omega)H(j\omega) \quad (7)$$

取匹配滤波器的传递函数 $H_r(j\omega)$ 为发射信号频谱的复共轭,即:

$$H_r(j\omega) = S^*(j\omega) \quad (8)$$

回波信号 $S_r(t)$ 经匹配滤波处理后,输出信号的频谱 $S_o(j\omega)$ 为:

$$S_o(j\omega) = S_r(j\omega)S^*(j\omega) \quad (9)$$

将式(7)代入式(9)中,得:

$$S_o(j\omega) = S(j\omega)H(j\omega)S^*(j\omega) = |S(j\omega)|^2 H(j\omega) \quad (10)$$

设发射信号 $S(t)$ 为线性调频信号(linear frequency modulation, LFM),其幅频特性为常数 k ,代入式(10)中并做傅里叶反变换,得:

$$S_o(t) = kh(t) = k\sigma\delta(t - \tau) \quad (11)$$

由式(11)可知,输出信号经匹配滤波后,其时域波形在 $t = \tau$ 处存在峰值,通过提取该峰值,即可获得回发信号的接收时刻。

1.3 阵列工作参数设计

舷侧阵声纳系统需具备对500 m距离水下目标的探测能力,且受限于载体平台尺寸,水听器阵列最大长度为1 m。

因此,需结合系统性能及尺寸要求,确定阵列的工作参数,包括阵元个数及间距、发射信号的中心频率、信号带宽及脉宽等。

信号中心频率 f_0 与最远探测距离 r_m 满足如下关系:

$$f_0 = \left(\frac{250}{r_m} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (12)$$

为保留一定的设计余量,取 $r_m = 1$ km,计算得到 $f_0 = 39.69$ kHz,故设信号中心频率为40 kHz。

依据半波长准则,阵元间距确定为18 mm。水听器阵列由4个子阵列构成,共计48阵元,总长度1 m。具体阵列结构如图4及5(a)所示。

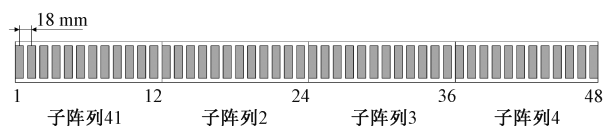
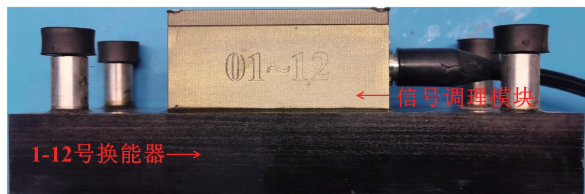


图4 舷侧阵声纳布阵示意图

Fig. 4 Schematic diagram of a flank array sonar deployment



(a) 换能器阵列
(a) Hydrophone array



(b) 舷侧阵声纳系统
(b) Flank array sonar system

图5 舷侧阵声纳系统实物

Fig. 5 Photograph of the flank array sonar system

为保证各阵元间的幅相误差满足系统整体指标要求,在水听器制备前,通过测试压电材料的阻抗曲线,筛选出50组,40 kHz频率处阻抗误差在 $\pm 10\%$ 以内的材料,

用于水听器的制备;且在水听器上以及安装基板上预留多个定位孔,避免水听器安装位置的误差所带来的影响。

声纳系统工作在被动模式下,由外置发射换能器发射声信号,水听器阵列负责接收。由于外置发射换能器安装在声纳系统附近,因此该系统仍适用于主动声纳方程:

$$SE = SL - 2TL + TS - (NL - DI) - DT + PG \tag{13}$$

式中: SE 为信号余量; SL 为发射声源级; TL 为单程传播损失; TS 为目标强度; NL 为环境噪声级; DI 为接收指向性指数; DT 为检测阈; PG 为信号处理增益,上述各量单位均为 dB,为保证目标被准确探测,需确保信号余量 $SE > 0$ 。各参数的取值如表 1 所示。

表 1 声纳方程参数取值

Table 1 Parameter settings for sonar equation

参数	取值
SL	205 dB
TL	58.53 dB @ 500 m
TS	-15 dB
NL	73.39 dB @ 40 kHz
DI	16.81 dB
DT	6 dB
PG	16.02 dB

表 1 中 NL 取 40 kHz 频率下恶劣海况对应的海洋环境噪声。 DI 近似于阵列的空间增益 AG ,其表达式如式(14)所示。此处取 48 元线阵计算得到的的空间增益 16.81 dB。

$$AG = 10\log N \tag{14}$$

采用匹配滤波技术,可有效提高系统对声纳信号的处理能力,其处理增益 PG 表示为:

$$PG = 10\log(2BT) \tag{15}$$

式中: B 为发射信号带宽; T 为信号脉宽。

选用带宽 500 Hz,脉宽 40 ms 的脉冲信号,其处理增益为 16.02 dB,满足对 500 m 距离目标的探测需求。

1.4 系统性能验算

确定阵列的工作参数后,需对阵列的性能进行验算,检查是否满足应用需求。将表 1 中参数代入式(13),计算得到阵列探测不同距离目标时的信号余量,结果如表 2 所示。

表 2 不同目标距离下信号余量

Table 2 Signal excess at different target ranges

目标距离/m	信号余量/dB
100	61.61
300	38.89
500	26.38
1 000	5.21

表 2 结果表明,系统可实现对 500 m 距离目标的探测,具备对 1 000 m 以上距离目标的探测能力。

阵列的方位分辨力 $\Delta\theta$ 和距离分辨力 Δd 由声信号带宽、信号中心波长及声纳有效孔径决定:

$$\Delta\theta = \frac{57.3\lambda}{L\cos\theta_0} \tag{16}$$

$$\Delta d = \frac{c}{2B} \tag{17}$$

式中: λ 为信号中心波长; L 为有效孔径; θ_0 为目标相对阵列法线方向的角度; c 为水中声速; B 为信号带宽。

对于舷侧阵声纳,其有效孔径为阵列全长,取水中声速为 1 500 m/s。当目标位于阵列法向时,计算得到方位分辨力为 2.43°,距离分辨力为 1.52 m。图 5 所示为所研制的水听器阵列及声纳系统实物。

2 电子系统设计

2.1 电子系统总体设计及指标

电子系统总体设计如图 6 所示,主要由主控模块、信号调理模块、同步采集模块、数据存储模块和电源模块组成。

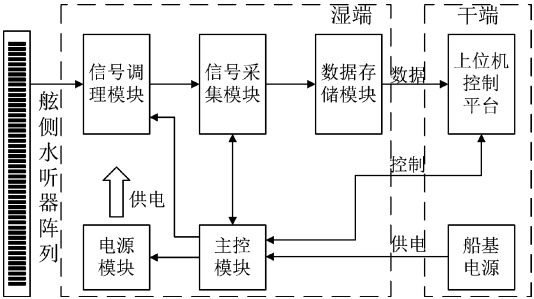


图 6 电子系统总体设计

Fig. 6 Electronic subsystem architecture

信号调理模块负责实现水听器的阻抗匹配,并对接收到的信号进行放大、滤波等预处理操作,确保信号质量满足后续处理要求。同步采集模块对调理后的 48 路信号进行并行模数转换,并通过千兆以太网将数据实时传输至数据存储模块。数据存储模块负责实时保存数据,并预留上位机访问接口,支持数据检索及后续分析。

依据项目要求,电子仓采用柱状结构,其高度为 30 cm,直径为 20 cm,仓内最大仅能安装容量为 1.5 Ah 的电池。为保障系统连续工作时长不少于 12 h,电子系统功耗需低于 30 W。同时,为确保舷侧阵声纳系统对目标的探测精度,要求电子系统自噪声低于环境噪声级 6 dB。此外,各采集通道需具备较高的幅相一致性,确保波束形成的准确性。由此提出如表 3 所示的电子系统设计指标。

表 3 电子系统设计指标

Table 3 Electronic subsystem design specifications

参数	设计指标
通道数	48
功耗	≤30 W
采样率	≥200 kHz
信号增益	38~70 dB
调理电路等效输入噪声	≤10n V√Hz @ 40 kHz
幅度一致性	≤±0.5dB @ 40 kHz
相位一致性	≤±2° @ 40 kHz
数据存储速率	≥50 MB/s
存储容量	1 TB
数据存储丢包率	≤0.1%

2.2 信号调理模块

信号调理模块结构如图 7 所示,由放大及滤波电路组成。第一级放大增益设为 32 dB,第二级放大电路对系统噪声贡献较低,选用低功耗的 4 通道运算放大器 OPA4205,设计增益为 12 dB。压控放大部分选用 AD605,实现-6~26 dB 的增益控制,满足增益范围的设计指标。

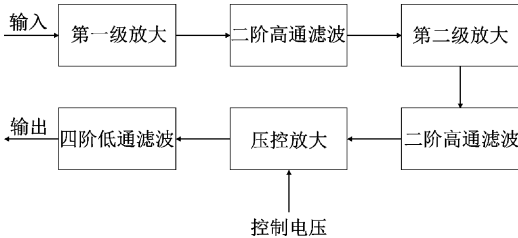


图 7 信号调理流程

Fig. 7 Signal conditioning process flow

第一级放大电路还需实现与水听器间的阻抗匹配,要求其输入阻抗高于水听器输出阻抗 100 倍以上。实测水听器容值为 2.2 nF,在 40 kHz 频率下,其输出阻抗为 1.8 kΩ。因此将该级电路的输入阻抗设计为 10 MΩ,满足阻抗匹配要求,具体电路如图 8 所示。

第一级放大电路采用 OPA1612 运算放大器,其在 1 kHz 处的噪声为 1.1 nV/√Hz,满足系统低噪声指标要求。滤波电路采用 Sallen-Key 拓扑的巴特沃斯滤波器,保证通带内的平坦度。

2.3 同步采集模块

同步采集模块由控制模块和 3 个 16 通道模数转换模块构成,每个模块内设计有两片 AD7768 模数转换芯片,采用 FPGA 做为主控芯片。针对系统多通道特性及严格的幅相一致性要求,需对时钟信号进行同步优化

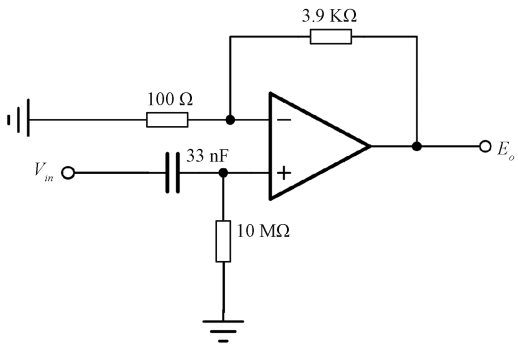


图 8 第一级放大电路

Fig. 8 First-stage amplifier circuit

设计,确保各 ADC 芯片的采样时钟与系统时钟的严格同步,该模块结构如图 9 所示。

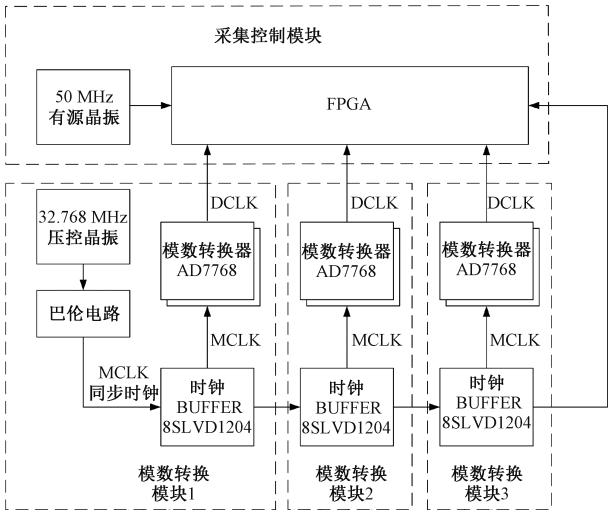


图 9 同步采集模块结构

Fig. 9 Synchronized acquisition module structure

以模数转换模块 1 为例,由高精度压控晶振产生的 32.768 MHz 的单端 MCLK 信号,经巴伦电路转换为差分 MCLK 时钟信号,提高时钟信号的抗干扰能力。利用时钟缓冲器增强差分时钟的驱动能力,接入模块内的两片 ADC 中,保证时钟信号的同步。

2.4 数据存储模块

图 10 为数据存储系统结构设计,该模块采用三级分布式结构,主要由主控模块、存储模块及千兆以太网交换机构成。

处理器选用集成 ARM Cortex-A72 的 LS1028A 高性能处理器,将来自采集模块的数据实时写入存储模块中。同时利用经过校准的实时时钟,为实验数据打上时间戳,便于后续的数据溯源。

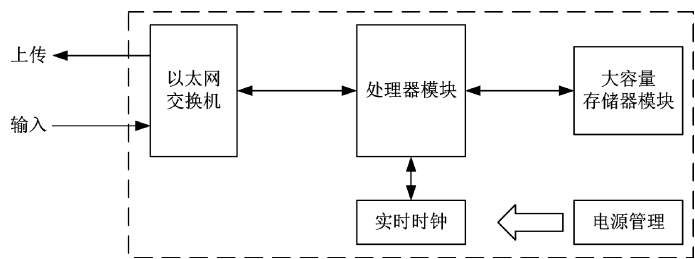


图 10 数据存储模块结构
Fig. 10 Data storage module structure

3 性能测试

3.1 系统关键指标测试

在实验室环境下,对系统多项关键指标进行了测试,以评估其性能并验证是否满足设计要求。

1) 功耗测试

采用 24 V 直流电源为系统供电,测得工作电流为 1.09 A,整体功耗为 26.16 W,满足设计指标要求。

2) 调理电路自噪声测试

自噪声测试方案如下:将信号调理模块的输入通道短接至地,使用低噪声信号采集卡 NI-4431 采集调理电路的输出信号 $u(t)$,并按式 (18) 计算其功率谱密度 $S(f)$ 。

$$S(f) = \mathcal{F}\{r(\tau)\} \tag{18}$$

式中: $r(\tau)$ 为 $u(t)$ 的自相关函数,如式 (19) 所示。

$$r(\tau) = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} u(t) \times u(t + \tau) d\tau \tag{19}$$

图 11 所示为增益设置为 54 dB 时,输出信号的功率谱密度曲线。40 kHz 频率处测得的噪声功率谱密度为 -118 dB,折算至输入端为 2.52 nV/√Hz,满足设计指标要求。

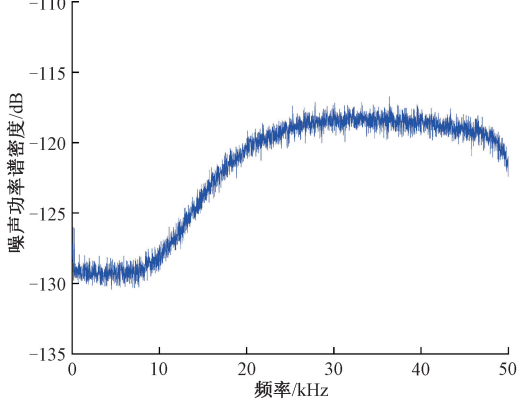


图 11 信号调理模块自噪声频谱
Fig. 11 Self-noise spectrum of the
signal conditioning module

表 4 为不同增益下,特定频点处的自噪声测试结果。由表可知,调理模块在不同增益下具有较为一致的等效输入噪声水平。

表 4 不同增益下自噪声测试结果

Table 4 Self-noise test results at different gains (dB)			
增益	35 kHz	40 kHz	45 kHz
38	-128.41	-129.08	-129.87
44	-124.82	-125.39	-125.63
54	-117.75	-118.80	-119.46
70	-101.32	-102.71	-103.23

3) 幅相一致性测试

依据 GB/T 16165-1996《水听器相位一致性测量方法》以及 GB/T 4130.1-2025《水听器校准 第一部分:自由场校准方法》^[21-22],在消声水池中采用自由场校准法对声呐系统整体的幅相一致性进行测试。

实验过程中,利用发射换能器发射频率为 40 kHz 的单频连续正弦波信号,通过电子系统采集并记录各水听器对声场的响应。以 1 号水听器为基准,其余各水听器的相对幅度偏差 ΔG_i 为:

$$\Delta G_i = 20\log \frac{A_i}{A_1} \tag{20}$$

相对相位偏差 $\Delta \varphi_i$ 表示为:

$$\Delta \varphi_i = 2\pi f \Delta t_i \tag{21}$$

式中: Δt_i 为待测水听器相对 1 号水听器的时间差,可通过计算互相关函数 $R_i(\tau)$ 计算得到。

假定水听器 1 和水听器 i 的输出信号分别为 $U_1(t)$ 和 $U_i(t)$,对应的频谱为 $U_1(j\omega)$ 和 $U_i(j\omega)$,依据互相关定理:

$$R_i(\tau) = \mathcal{F}^{-1}\{U_1^*(j\omega) \times U_i(j\omega)\} \tag{22}$$

得到水听器 1 与水听器 i 的互相关函数 $R_i(\tau)$,该函数的峰值位置即为时间差 Δt_i 。

幅相一致性的测试结果如图 12 所示,在 40 kHz 频率下,最大幅度偏差为 2.88 dB,最大相位偏差为 5.93°,满足设计指标要求。

4) 存储系统测试

利用上位机模拟采集模块,向存储系统发送编辑好的数据包,对存储系统进行性能测试,测试结果如表 5 所示。

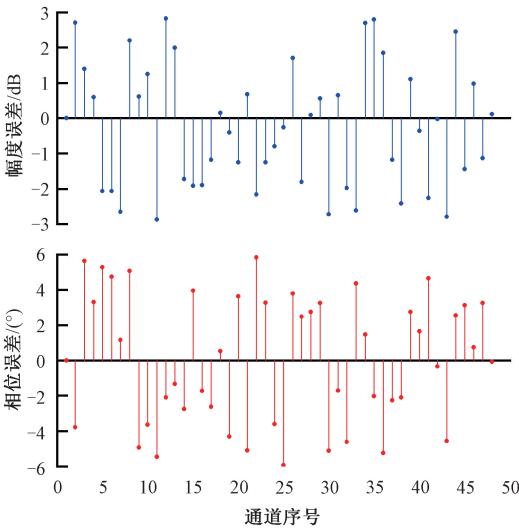


图 12 幅相一致性测试结果

Fig. 12 Amplitude and phase consistency test results

表 5 存储系统性能测试

Table 5 Storage system performance test

参数	第 1 次测试	第 2 次测试
发送数据量/GB	890.00	889.79
测试总耗时/min	4 h 54	4 h 54
平均存储速率/(MB/s)	51.73	51.68
发送数据包数	799 021 925	799 000 000
存储数据包数	799 020 617	798 998 514
丢失数据包数	1 308	1 486
丢包率/%	0.000 164	0.000 186

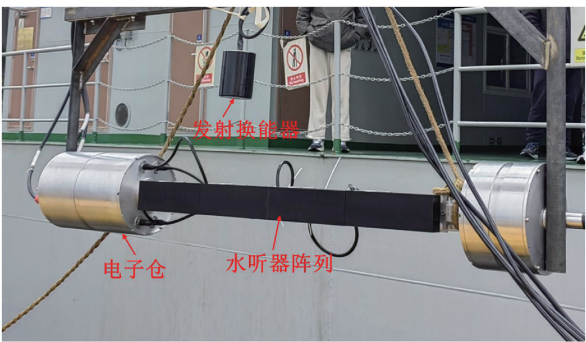
由表中测试数据可知,系统的存储速率高于 50 MB/s、丢包率小于 0.1%,满足设计指标要求。

3.2 湖上试验

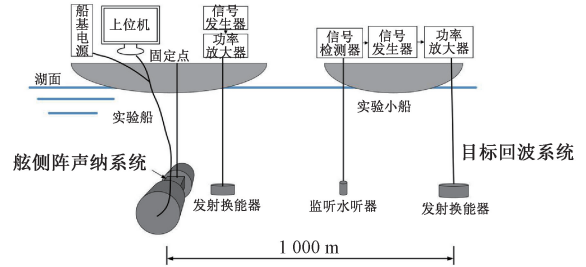
湖上试验系统由舷侧阵声纳系统以及目标回波系统两部分组成,舷侧阵声纳系统通过刚性连接杆与转接法兰固定在实验船上,水听器阵列朝向开阔水域,整体布放于水下 15 m 处。目标回波模拟系统,主要包括监听水听器、信号检测器、功率放大器。由发射换能器发送的脉冲声信号被监听水听器检测到发射的声脉冲信号后,信号发生器立刻产生应答脉冲信号,通过功率放大器放大后由目标侧的发射换能器向舷侧阵发送应答信号,如图 13 所示。

1) 系统分辨力测试

分辨力实验中,目标回波系统被固定在距舷侧阵系统约 1 000 m 处,并保持与舷侧阵处于同一深度。舷侧阵端的发射换能器,发射中心频率为 40 kHz、带宽 500 Hz、脉宽为 40 ms 的双曲调频信号。目标回波系统检测到脉冲信号后,立即回发经衰减处理的回波信号。图 14 为舷侧阵采集到的时域信号。



(a) 湖上试验现场



(b) 湖上试验示意图

(b) Schematic diagram of hydroacoustic testing on the lake

图 13 湖上试验系统示意图

Fig. 13 Schematic diagram of the lake test system

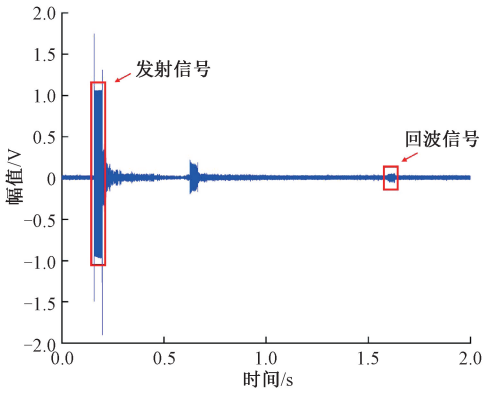


图 14 1 000 m 处通道 1 采集的时域信号

Fig. 14 Signal acquired by channel 1 at 1 000 m range

依据前文所述方法,对接收到的时域信号进行处理,得到的结果如图 15 所示。

图 15 中主瓣峰值对应的方位角为 94°,距离为 1 028 m,即系统定位结果。分辨力特性由主瓣-3 dB 波束宽度决定,实测角度分辨力为 2.10°,距离分辨力 1.35 m,与理论值 2.82°和 1.32 m 基本一致。

2) 系统定位误差测试

舷侧阵声纳对目标的定位误差主要包括距离误差和方位误差。实验中,通过 GPS 系统将目标回波系统锚定于舷侧阵声纳 30°方位处,并控制二者距离为 500 m,进

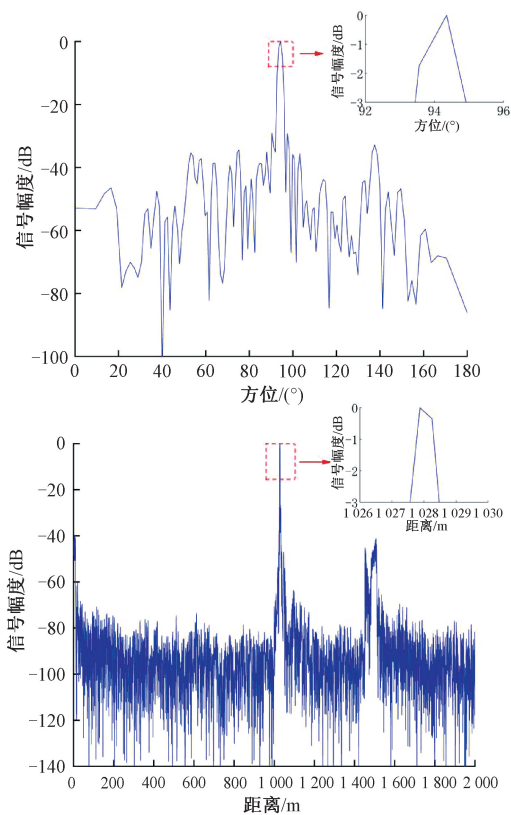


图 15 舷侧阵声纳测向测距结果

Fig. 15 Flank array sonar bearing and ranging results

行多次重复实验,结果如表 6 所示。

表 6 舷侧阵声纳系统多次定位结果

Table 6 Flank array sonar system localization results

数据类型	测距结果/m	测向结果/(°)
测量值 1	509.36	34.44
测量值 2	513.16	32.78
测量值 3	508.91	33.96
测量值 4	510.09	35.77
测量值 5	511.56	32.87
均值	510.61	33.96

根据表 6 数据,系统测距误差为 2.12%,测向误差为 3.96°。主要误差来源包括分辨率引起的量化误差、声速测量误差以及声传播的多途效应。

4 结 论

本文以水下探测平台为应用背景,系统阐述了舷侧阵声纳的测向测距原理及其电子系统设计方法。实验证明,所研制的声纳电子系统,自噪声谱密度低至 2.52 nV/√Hz @ 40 kHz,通道间幅相一致性误差控制在 3 dB 和 6°范围内,数据存储模块满足设计指标要求,系统方位分辨率 2.10°,距离分辨率 1.35 m;对 500 m 距离、30°方位角处的目标,测距误差为 2.12%,测向误差为 3.96°,满

足水下探测平台的应用需求。

参考文献

[1] 王军成,孔庆霖,厉运周,等. 基于浮标的水下目标探测研究进展及展望[J]. 海洋学报,2025,47(2):1-14.
WANG J CH, KONG Q L, LI Y ZH, et al. Research progress and prospects of underwater target detection based on buoys[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2025, 47(2):1-14.

[2] 张延厚,王超,张奇,等. 水声目标探测和识别融合技术发展综述[J]. 信号处理,2023,39(10):1711-1727.
ZHANG Y H, WANG CH, ZHANG Q, et al. Development review of fusion technology for underwater acoustic target detection and recognition[J]. Journal of Signal Processing, 2023, 39(10):1711-1727.

[3] 孙大军,侯开阳,滕婷婷,等. 空时多普勒频移域运动小目标的抗干扰探测方法[J]. 声学学报,2022,47(2):161-174.
SUN D J, HOU K Y, TENG T T, et al. Anti-jamming detection method for small moving targets in space-time Doppler shift domain[J]. Acta Acustica, 2022, 47(2):161-174.

[4] 尹涵,陈建峰,张董哲. 单水听器强化学习无源自导方法[J]. 声学学报,2025,50(1):59-67.
YIN H, CHEN J F, ZHANG D ZH. Passive homing method using reinforcement learning with a single hydrophone[J]. Acta Acustica, 2025, 50(1):59-67.

[5] 孟欣怡. 基于频散特征的浅海宽带声源单水听器被动测距方法研究[D]. 杭州:浙江大学,2024.
MENG X Y. Research on passive ranging method for shallow water broadband sound source based on dispersion characteristics using a single hydrophone [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2024.

[6] 宋鹏飞. 基于单水听器的运动目标被动测距[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2021.
SONG P F. Passive ranging for moving targets based on a single hydrophone [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2021.

[7] WANG G, LIU F C, YI S, et al. A method for estimating the shape of towed array based on genetic algorithm [C]. IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Compting, 2017.

[8] WANG S, DAI W G, LI H T. Spatial gain research of complex towed array sonar distortion [C]. IEEE 2nd International Conference on Frontiers of Sensors Technologies, 2017: 411-416.

[9] 陈筱月,马晓川,李璇,等. 混合 1 范数与全变分约束下的海底目标探测[J]. 声学学报, 2023, 48(4): 632-645.
CHEN X Y, MA X CH, LI X, et al. Seafloor target

- detection under mixed L1 norm and total variation constraints[J]. *Acta Acustica*, 2023, 48(4): 632-645.
- [10] 杨刚,邢博,徐景峰,等. 一种线列阵反卷积波束形成高分辨算法[J]. *舰船科学技术*, 2023, 45(23): 127-130.
- YANG G, XING B, XU J F, et al. A high-resolution algorithm for line array deconvolution beamforming[J]. *Ship Science and Technology*, 2023, 45(23): 127-130.
- [11] 周健,宋雪晶,刘福臣. 拖船噪声对拖线阵声呐的干扰特性分析[J]. *声学技术*, 2023, 42(5): 609-615.
- ZHOU J, SONG X J, LIU F CH. Analysis of interference characteristics of tow-ship noise on towed linear array sonar[J]. *Technical Acoustics*, 2023, 42(5): 609-615.
- [12] 陈新华,张龙恩,郑恩明,等. 深海海底反射拖船噪声伪目标判别[J]. *仪器仪表学报*, 2024, 45(10): 272-283.
- CHEN X H, ZHANG L E, ZHENG E M, et al. Discrimination of pseudo-targets from deep-sea bottom-reflected tow-ship noise[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2024, 45(10): 272-283.
- [13] 石娟. 水下多目标被动定向关键技术研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2020.
- SHI J. Research on key technologies for passive direction finding of underwater multi-targets[D]. Xian: Northwestern Polytechnical University, 2020.
- [14] 左震,黄泓赫,孙备,等. 基于无人艇载侧扫声呐的水下目标定位方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2023, 44(11): 310-319.
- ZUO ZH, HUANG H H, SUN B, et al. Research on underwater target localization method based on unmanned surface vehicle-mounted side-scan sonar[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023, 44(11): 310-319.
- [15] GUANG Y, ZHENG Y, WANG S T, et al. Review on detection and localization of underwater target[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 170: 2127-2131.
- [16] HOU X, CHEN Y, ZHANG B, et al. Review of research progress on passive direction-of-arrival tracking technology for underwater targets[J]. *Remote Sensing*, 2024, 16(23): 4511.
- [17] 杨秀庭,赵晓哲. 远程鱼雷目标主动声纳探测性能分析[J]. *兵工学报*, 2012, 33(4): 503-507.
- YANG X T, ZHAO X ZH. Performance analysis of active sonar detection for long-range torpedo targets[J]. *Acta Armamentarii*, 2012, 33(4): 503-507.
- [18] 刘扬,张传营,赵景玉,等. 多麦克风阵列数据融合声源定位方法研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2024, 38(7): 97-108.
- LIU Y, ZHANG CH Y, ZHAO J Y, et al. Research on sound source localization method based on multi-microphone array data fusion[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2024, 38(7): 97-108.
- [19] 周毓昌. 用于水声主动探测系统的低信噪比高速测向方法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2023.
- ZHOU Y CH. Research on low signal-to-noise ratio high-speed direction finding method for underwater acoustic active detection systems[D]. Changsha: Hunan University, 2023.
- [20] 梁民赞,费志刚. 高精度舰艇声纳测量误差标定方法[J]. *兵器装备工程学报*, 2018, 39(7): 79-82.
- LIANG M Z, FEI ZH G. Calibration method for high-precision ship sonar measurement errors[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2018, 39(7): 79-82.
- [21] 船舶总公司. 水听器相位一致性测量方法: GB/T 16165-1996[S]. 中国标准出版社, 1996.
- China State Shipbuilding Corporation. Method for measurement of hydrophone phase consistency: GB/T 16165-1996[S]. China Standards Press, 1996.
- [22] 全国声学标准化技术委员会. 声学 水听器校准 第一部分: 自由场校准方法: GB/T 4130.1-2025[S]. 中国标准出版社, 2025.
- National Technical Committee 17 on Acoustics of Standardization Administration of China. Acoustics Calibration of hydrophones Part 1: Free-field calibration method: GB/T 4130.1-2025[S]. China Standard Press, 2025.

作者简介



卢健, 现为中国计量大学硕士研究生, 主要研究方向为水下目标探测。

E-mail: lujian0225@126.com

Lu Jian is now a M. Sc. Candidate of China Jiliang University. His main research interest includes underwater target detection.



郭世旭(通信作者), 现为中国计量大学副教授, 硕士生导师, 主要从事新型水声换能器及其阵列系统、微弱信号处理及水声计量测试方面的研究。

E-mail: guoshixu@cjl. edu. cn

Guo Shixu (Corresponding author) is now an associate professor and M. Sc. supervisor at China Jiliang University. His main research interests include new-type underwater acoustic transducers and array systems, weak signal processing, and underwater acoustic metrology and testing.