

低功耗矢量水听器采集与信号处理系统设计

蔡兵兵 李世阳 刘科峰 陈希 王斌 谭旭

Design of low-power vector hydrophone acquisition and signal processing system

CAI Bingbing, LI Shiyang, LIU Kefeng, CHEN Xi, WANG Bin, TAN Xu

在线阅读 View online: <http://www.sxjs.ac.cn/article/doi/10.16300/j.cnki.1000-3630.23092603>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一种可用于自容式水听器的信号采集电路设计

A design of signal acquisition circuit for self-contained hydrophone

声学技术. 2023, 42(3): 306-313. <https://doi.org/10.16300/j.cnki.1000-3630.2023.03.006>

水下滑翔机声学测量系统的低功耗采集存储系统设计

Design of low-power consumption acquisition and storage system for acoustic measurement system of underwater glider

声学技术. 2021, 40(3): 353-357. <https://doi.org/10.16300/j.cnki.1000-3630.2021.03.009>

通用型高频宽带ADCP信号处理系统设计与实现

Design and implementation of universal high frequency broadband ADCP signal processing system

声学技术. 2020, 39(1): 110-116. <https://doi.org/10.16300/j.cnki.1000-3630.2020.01.019>

波浪滑翔器智能海洋环境噪声观测系统

Wave glider intelligent marine ambient noise measurement and observation system

声学技术. 2023, 42(5): 580-587. <https://doi.org/10.16300/j.cnki.1000-3630.2023.05.004>

MEMS矢量水听器声压通道封装技术研究

Research on the encapsulation method of the sound pressure channel of MEMS vector hydrophone

声学技术. 2021, 40(2): 295-300. <https://doi.org/10.16300/j.cnki.1000-3630.2021.02.023>

一种单矢量水听器通道增益一致性分析方法

A channel gain consistency analysis method for single vector hydrophone

声学技术. 2022, 41(4): 624-629. <https://doi.org/10.16300/j.cnki.1000-3630.2022.04.022>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.23092603 CSTR: 32055.14.sxjs.1000-3630.23092603

引用格式: 蔡兵兵, 李世阳, 刘科峰, 等. 低功耗矢量水听器采集与信号处理系统设计[J]. 声学技术, 2025, 44(3): 386-394. [CAI Bingbing, LI Shiyang, LIU Kefeng, et al. Design of low-power vector hydrophone acquisition and signal processing system[J]. Technical Acoustics, 2025, 44(3): 386-394.]

低功耗矢量水听器采集与信号处理系统设计

蔡兵兵¹, 李世阳¹, 刘科峰², 陈希², 王斌³, 谭旭¹

(1. 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200241; 2. 中国人民解放军国防科技大学前沿交叉学科学院, 江苏南京 211101;
3. 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200241)

摘要: 自容式矢量水听器可以同时获取声压信号和三维矢量场信息, 为满足水下长时间工作, 对其数据采集平台的功耗、数据处理能力、同步实时存储速度提出了很高要求。而现有矢量水听器采集平台仍存在采集通道少、无法同时满足低功耗和时频域分析的问题。因此, 文章提出了一种基于 STM32F407 的自容式矢量水听器采集存储数据分析平台, 不仅实现了八通道的同步信号采集与高速存储, 还具有快速傅里叶变换及频域互谱分析、方位估计等功能。实验室与海上试验结果表明: 该系统工作稳定, 实现了八通道实时数据采集存储, 各通道功耗约为 0.16 W。在连续采集存储工作模式下, 执行声压和振速联合时频域分析进行方位估计, 本系统可工作 10 d 以上。该平台研究为矢量水听器水声信号长时间多通道同步采集、存储、特征提取和目标探测与识别奠定了良好的基础, 也为多路标量水听器阵列的低功耗采集与信号处理提供了技术支撑。

关键词: 自容式矢量水听器; 低功耗; 信号处理; 数据采集存储

中图分类号: TB565

文献标志码: A

文章编号: 1000-3630(2025)-03-0386-09

Design of low-power vector hydrophone acquisition and signal processing system

CAI Bingbing¹, LI Shiyang¹, LIU Kefeng², CHEN Xi², WANG Bin³, TAN Xu¹

(1. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200241, China; 2. College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Nanjing 211101, Jiangsu, China; 3. School of Naval Architecture, Ocean & Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200241, China)

Abstract: The self-contained vector hydrophone can simultaneously acquire sound pressure signals and three-dimensional vector field information. To meet the requirements of long-term underwater operation, high demands are placed on its data acquisition platform in terms of power consumption, data processing capabilities, and synchronous real-time storage speed. However, the reported vector hydrophone acquisition platform still has the problems of a limited number of acquisition channels and an inability to simultaneously achieve low power consumption and time-frequency domain analysis. Therefore, a self-contained vector hydrophone acquisition and storage data analysis platform based on the STM32F407 is proposed. This platform not only implements synchronous signal acquisition and high-speed storage for eight channels, but also includes functions such as FFT and frequency-domain cross-spectrum analysis, as well as direction estimation. The results of laboratory and offshore tests demonstrate that the system operates stably and achieves 8-channel real-time data acquisition and storage. The power consumption of each channel is approximately 0.16 W. Under the mode of joint time-frequency domain analysis of sound pressure and vibration velocity along with azimuth estimation, the system can work continuously for more than 10 d. This research lays a solid foundation for long-term, multi-channel simultaneous acquisition, storage, feature extraction, target detection and recognition of vector hydrophone underwater acoustic signals, while providing technical support for low-power acquisition and signal processing in multi-channel scalar hydrophone arrays.

Key words: self-contained vector hydrophone; low-power consumption; signal processing; data acquisition and storage

0 引言

收稿日期: 2023-09-26; 修回日期: 2023-11-19

作者简介: 蔡兵兵 (1997—), 男, 河南开封人, 硕士研究生, 研究方向为水声信号系统设计与信号处理。

通信作者: 李世阳, E-mail: shiyangli@sjtu.edu.cn

自容式矢量水听器体积小, 隐蔽性高, 可以进行长时间数据采集、存储分析, 具有广泛的应用前景。矢量水听器不仅能获取声压信息, 还可以同时

采集矢量场信息。通过测量某一时刻的声压和互相正交的 x, y, z 三个方向的质点振速^[1-2]，使用单个矢量水听器就可以获取声源的方向信息^[3]。

对于水下探测系统来说，目标信号是相干信号，各向同性的海洋环境噪声在声压和振速通道内是不相关的。声压和振速信息经过联合处理后，相关成分会增强，而不相关的部分将会被抑制。互谱运算能够提高信噪比，进而提高矢量水听器系统的探测能力和定向精度。

近年来，众多学者对水声信号的采集与存储方法进行了设计与研究。李晨歌等^[4]提出了一种基于现场可编程逻辑门阵列 (field programmable gate array, FPGA) 与 STM32 系统的自容式水听器，支持四通道数据采集存储，功耗为 2 W。贾启航^[5]设计了一种基于 TMS320C6000 系列的数据存储与处理系统，可以采集存储四通道数据，功耗约为 2.6 W。赵宝平等^[6]采用 STM32 实现了自容式水听器的数据采集存储，功耗约为 0.73 W。近年来市场上也有公司推出了水听器采集平台，如：和成系统有限公司的水听器系统实现了 10 Hz~4 kHz 的工作带宽、功耗为 2.1 W、工作时长为 90 h 的单通道数据采集存储；中科海迅公司的 PTP 采集传输系统实现了 10 Hz~40 kHz 的采样带宽，功耗为 2 W，实现了五通道采集存储，工作时长为 50 h。但这些平台仅能实现数据采集存储，无法进行信号处理和特征提取且功耗较大。

为了实时处理水声信号，张一凡等^[7]设计了三通道数据的实时方位分析系统，实现了基于时域的二维方位估计，但受限于系统的计算能力，无法实现频域特征分析。吕勇等^[8]设计了一种单矢量水听器四通道信号采集与处理系统，采用 FPGA+DSP 处理器架构实现了对三维采集数据进行频域变换和方位估计，但系统功耗较大。王文龙等^[9]设计了一种采用 DSP 为处理核心的四通道采集存储方位估计系统，系统功耗同样较大，存储能力不高。此外，还有部分矢量水听器采集处理系统需要借助于试验场或岸站的计算机系统，无法满足水下长时独立采集与探测的需求^[10-12]。综上所述，现有矢量水听器采集平台存在采集通道少、无法同时满足低功耗和实时时频域分析的问题。在进行系统设计时，需要综合考虑工作周期、采样率、计算能力、功耗等因素，既要满足数据采集与数据处理要求，又要降低功耗和电源体积，增加续航时间，这对水听器采集处理系统设计提出了新的挑战。

本文提出了一种基于 STM32F407 的低功耗自容式矢量水听器采集存储数据分析平台，并实现了

快速傅里叶变换 (fast Fourier transform, FFT) 及频域互谱分析、方位估计等功能。该系统不仅满足了长时间续航和实时八通道信号同步采集与高速存储要求，还实现了频域特征计算与方位角估计。该系统为矢量水听器以及标量水听器阵列的水声信号低功耗同步采集探测平台提供了一种新的设计方案。

1 矢量水听器系统设计

1.1 总体概述

本文设计的低功耗自容式矢量水听器系统由矢量水听器、信号预处理、模拟-数字 (analog to digital, AD) 采样单元、存储与算法单元、电子罗盘、压力传感器等模块组成。系统结构如图 1 所示。

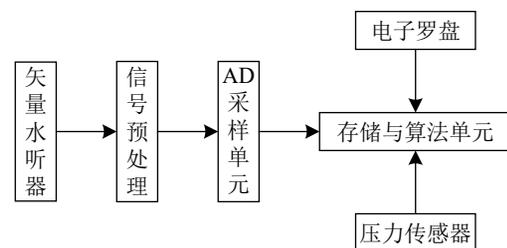


图 1 水听器系统结构图
Fig.1 Structure of hydrophone system

水声信号由矢量水听器获取，经过信号预处理模块和 AD 采样单元进入微控制器 (micro control unit, MCU) 的存储与算法单元，经过存储单元将 AD 采样数据、电子罗盘数据和压力传感器数据保存至 SD 卡，经过算法单元进行频域特征计算和方位角估计最后将算法运算结果保存。

本文测量系统结构图如图 2 所示。系统测量流程如下：当声源目标产生声信号，矢量水听器的声压通道和矢量通道会将声信号转化为微弱的模拟信号输出。输出的信号经过系统内置放大电路进行放大后，进入信号调理电路进行带通滤波和可调增益放大，之后信号进入 AD 采样电路。经 AD 采样电路采样后，数据通过直接存储器访问 (direct memory access, DMA) 存储到 SD 卡。

本文选用意法半导体公司生产的 STM32F407 作为主控芯片，对电源模块、AD 转换模块、自增益模块、数据存储模块、信号处理算法模块进行控制。通过 RS232 串口与上位机通信，实现系统控制、数据处理、系统配置等操作。使用单片机内置的 DSP 单元对采集到的数据进行时频域分析，然后存储分析结果。本系统通过 RS232 串口通信实现上位机指令、电子罗盘的姿态数据和压力传感器的深度数据的接收。电源管理模块实现了对电源的

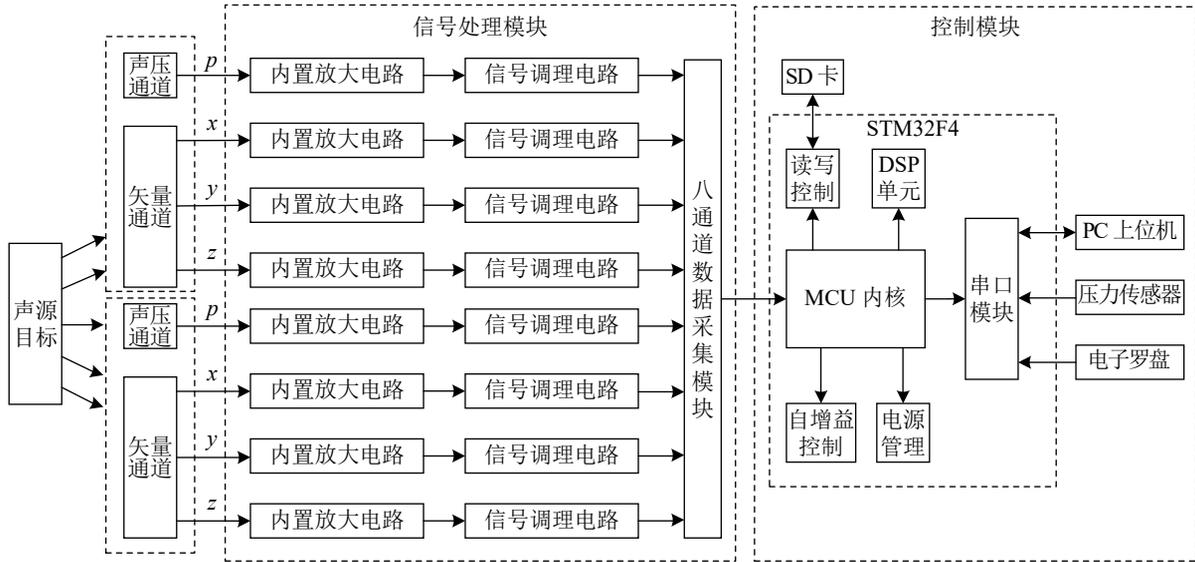


图 2 测量系统结构图

Fig.2 Structural diagram of the measurement system

控制和对电路各个模块的使能与失能的控制，为本系统降低功耗提供了保障。与已报道的二通道或四通道采集系统相比，本系统能够以更低功耗实现八通道数据的采集与高速存储。

1.2 互谱分析与声源方位估计算法原理

声源方位示意图如图 3 所示。图 3 中假设声源为 s ，与 x 轴的水平夹角为方位角 θ ，与 z 轴的夹角为俯仰角 α 。

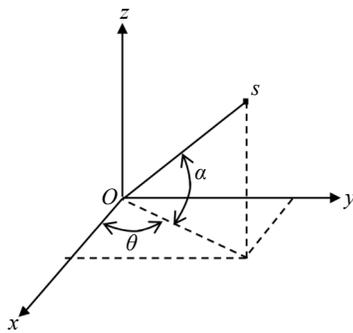


图 3 声源方位示意图

Fig.3 Schematic diagram of sound source position

假设声场满足远场平面波条件，在远场平面波声场中，波阻抗是实数，相关信号的声压和振速的相位是相同的，而在近声场中，波阻抗为复数，声压和振速间有相位差，且与频率有关。本文考虑远场平面波条件，设波阻抗为常数 $1^{[13-14]}$ 。

设声源信号为 $x(t)$ ，对于矢量水听器，振速分量 $v_x(t)$ 、 $v_y(t)$ 、 $v_z(t)$ 和声压 $p(t)$ 的表达式为

$$\begin{cases} p(t) = x(t) + n_p(t) \\ v_x(t) = x(t) \cos \theta \sin \alpha + n_{vx}(t) \\ v_y(t) = x(t) \sin \theta \sin \alpha + n_{vy}(t) \\ v_z(t) = x(t) \cos \alpha + n_{vz}(t) \end{cases} \quad (1)$$

对于噪声，声压与振速没有确定的相位关系，声源信号在这两个通道上为同相位。这是通过声压信息与振速信息联合处理提高探测信号信噪比以及完成目标方位估计的物理基础。根据傅里叶变换特性，两个同相位输入的能量集中在互谱的实部，所以目标信号能量集中在互谱输出的实部，虚部中主要为干扰能量^[15]。声压、振速联合分析与方位估计框图如图 4 所示。

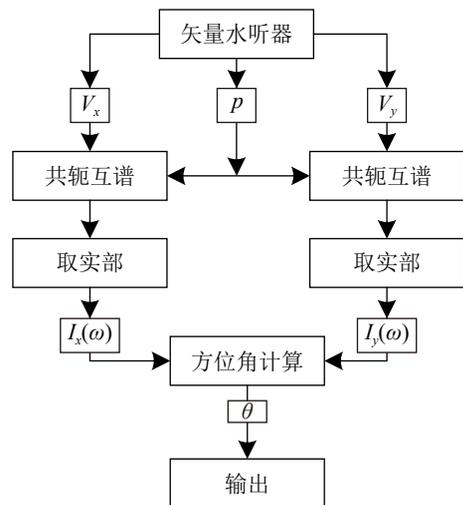


图 4 声压振速联合分析与方位估计框图

Fig.4 The block diagram of sound pressure and vibration velocity joint analysis and DOA estimation

首先对 $p(t)$ 、 $v_x(t)$ 、 $v_y(t)$ 分别做快速傅里叶变换，可以得到 $p(\omega)$ 、 $v_x(\omega)$ 、 $v_y(\omega)$ 。根据傅里叶变换结果，用式 (2) 计算声压和振速的互谱，其实部为

$$\begin{cases} I_x(\omega) = \text{Re}[P(\omega) V_x^*(\omega)] \\ I_y(\omega) = \text{Re}[P(\omega) V_y^*(\omega)] \end{cases} \quad (2)$$

式中：*表示共轭运算。利用式 (2) 可以求出声压

与振速的互谱，抑制了不相关的海洋噪声，从而获取更加精确的声源信号方位角信息^[16-18]。通过上述互谱运算后，使用式(3)来进行声源 s 的方位估计^[19-21]，得到方位角 θ ：

$$\theta = \arctan \frac{I_y(\omega)}{I_x(\omega)} = \arctan \frac{\operatorname{Re}[P(\omega)V_y^*(\omega)]}{\operatorname{Re}[P(\omega)V_x^*(\omega)]} \quad (3)$$

2 硬件电路设计

硬件电路设计主要包括主控单元模块、信号调理模块、AD采样模块、存储模块。本文在系统结构上设计了使用单主控芯片进行多通道采集和分析运算的水听器系统架构，与已公开报道文献系统相比，主控单元使用单一的具有DSP信号处理功能、高速DMA直接数据传输的ARM4架构芯片，无需再使用STM32+DSP或FPGA+DSP的双芯片组合架构来进行方位估计，减少了芯片数量，降低了功耗。系统对电子罗盘、信号调理电路、水听器驱动电路进行了低功耗管理设计。系统有连续采集和间隔采集两种工作模式，在间隔采集模式下，可分别设定工作和关断时间。系统首先进入工作状态，当完成设定工作小时后关断电源，系统进入休眠状态，休眠时间结束后系统自动唤醒，重新进入下一个采集周期。系统对主控芯片设置了休眠唤醒机制，在进入休眠状态时，系统会关断所有外设的电源，主控芯片也将进入低功耗模式，整个系统的功耗将进一步降低。针对已报道系统中无法同时满足低功耗与高运算能力的问题，为充分发挥矢量水听器的声压和振速信息联合处理提高信噪比的优势，我们综合平衡功耗与数据处理能力、存储速度、板间通讯等需求，选用具备DSP指令库、快速浮点运算能力、大存储速度和容量、高速通讯等综合性能优良的STM32F407芯片作为基础的系统架构。

2.1 主控单元模块

本文系统核心处理单元采用的是具有丰富外设资源的STM32F407芯片，其具有硬件浮点处理单元(floating point unit, FPU)模块，支持增强的DSP处理指令快速完成本系统的频域分析。该芯片的单周期乘加指令使乘法器可以在单周期内完成相乘或乘加指令，还具有单指令多数据(single instruction multiple data, SIMD)指令可以同时允许多个数据参与运算。当该芯片以168 MHz主频运行时，每秒执行百万条整数运算指令数(dhrystone million instructions executed per second, DMIPS)可以达到210 DMIPS的数据处理能力。开启硬件

FPU可以使浮点数运算速度提升5倍以上，因此使用该芯片可以快速完成FFT运算。该芯片还采用动态电压调节技术，通过不同功耗模式的切换，降低系统能耗，有利于进行低功耗设计。

2.2 信号调理模块

矢量水听器输出的信号比较微弱，在使用过程中输出信号容易受到环境噪声的影响，所以在进行模数转换前，必须对小信号进行调理。信号调理模块由前置放大电路、带通滤波电路、自增益放大电路三部分组成。本系统电路信号调理电路实物如图5所示。

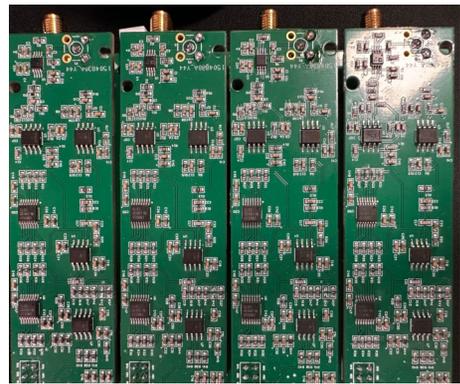


图5 信号调理电路实物

Fig.5 Picture of signal conditioning circuit

前置放大电路对矢量水听器采集到的微弱信号进行初步放大，以降低传输过程中环境噪声对信号采集的影响。本系统采集信号的带通区间为50 Hz~2.5 kHz，选用了巴特沃思型有源带通滤波器，设计了最大限度平坦的滤波电路。

由于接收信号能量不同，采集到的信号存在幅度变化较大的问题。本系统设计了自动增益控制模块，通过软件对信号幅度判断后对增益倍数放大或者缩小，使信号采集幅值保持合理区间，本系统设计可调增益范围为-40~40 dB。

2.3 A/D转换电路设计

为满足高采样率、多通道同步采样的需求，本系统采用亚德诺半导体公司的AD7606芯片。这是一款八通道、双极性、单个通道采样率最高能达到200千次每秒(kilo samples per second, KSPS)可以满足16位同步采样需求的低功耗ADC芯片。使用该AD芯片可以对八路模拟信号进行同步采样。本系统对2个四通道矢量水听器信号进行数据采集，减少了水听器阵列采集系统构建时的芯片数量，降低了系统的功耗。

2.4 存储模块设计

因为本采集系统具有多通道、高采样率同步采

集的特点,所以每秒需保存的数据量大,对存储速度也有很高的要求。使用 SD 卡可以满足系统小体积、低功耗的需求,512 G 大容量的存储卡也满足了存储数据量的要求。SD 卡存储使用安全数字输入输出接口 (secure digital input and output, SDIO) 传输方式,使用 SDIO 驱动模式相比于传统的 SPI 模式传输速度更快,可以满足存储速度要求。使用 DMA 技术不会占用 MCU 的资源,减轻了 MCU 负担。DMA 传输过程无需 CPU 参与,直接控制传输,也没有中断处理方式中的保留现场和恢复现场过程,通过硬件为 RAM 和 IO 设备开辟一条直接传输数据的通道,显著提高了 CPU 的效率,减少了系统功耗。

如果本系统以 8 kHz 的采样率进行八通道同步采样,每个采样点的字长为 3 B,每 512 个点为一个数据包,数据包还含有一组字长 40 B 的电子罗盘和压力传感器数据,一组字长 8 B 的系统状态数据,那么每秒钟存储的数据约为

$$8 \times 10^3 \times 8 \times \frac{512 \times 3 + 48}{512} \approx 198 \text{ kiB} \quad (4)$$

选用 512 GiB 的 SD 卡的存储时间约为

$$\frac{512 \times 1024 \times 1024 \times 1024}{198 \times 1024 \times 60 \times 60 \times 24} \approx 29 \text{ d} \quad (5)$$

根据估算,使用一张存储容量为 512 GiB 的 SD 卡大约可以工作 29 d。使用此卡可以满足本自容式矢量水听器系统续航时间为 10 d 以上的工作时长需求。

2.5 电子罗盘模块设计

由于矢量水听器在水下会受到外界环境干扰而出现姿态变化,所以需要姿态传感器进行角度补偿。姿态传感器选用觉微电子有限公司生产的 ECS-V1.5 型号低功耗倾角补偿式电子罗盘。该姿态传感器倾角范围为 $\pm 90^\circ$,工作电流仅为 10 mA,体积小、重量轻、航向精度高,精度可以达到 0.8° 以内。通过电子罗盘得到的水听器系统角度数据,可以实现对水听器系统姿态的实时检测。

3 矢量水听器系统软件设计

3.1 主程序设计

系统上电后进行初始化配置,矢量水听器输入信号经 AD7606 模数转换后输入系统 MCU 中,采取中断脉冲的方式判断启动采集信号。系统工作流程如图 6 所示。

系统开始工作后,首先进行时钟、中断、实时时钟 (real time clock, RTC)、SD 卡、串口的初

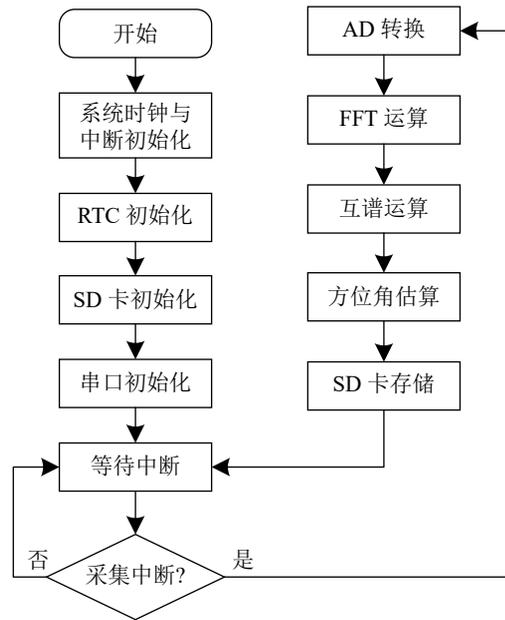


图 6 主程序工作流程图

Fig.6 Flow chart of the main program

始化工作。初始化工作完成后,开始等待接收中断,通过中断信号判断是否开始采集。如果进入接收中断,就开始采集程序:依次进入 AD 转换、FFT 运算、方位角估算、SD 卡存储模块。数据存储完成后等待下次采集中断到来。

3.2 SD 卡存储设计

系统对 SD 卡初始化后先进行 SD 卡状态配置,完成文件系统初始化,然后进行 DMA 传输设置:选择数据流和通道。存储模块流程如图 7 所示。为了提高存储速率,数据采用按块存储:采集开始后申请数据缓存区,将数据依次放入缓存区,采集 512 次后把数据按块写入 SD 卡,写入完成后释放数据缓存区。

3.3 频域与角度分析设计

基于 FFT 的互谱分析是提高矢量水听器探测信噪比的必要计算过程。为了实现频域分析,需要将系统采集到的数据进行 FFT 运算并分析频率。本文设计的数据处理流程如图 8 所示。

首先系统需要开启硬件 FPU 模块,按着设定系统使用的 FFT 算法参数,然后为输入输出数组申请内存。等待采样数据完成后,进行 FFT 计算。当不再需要使用数据时,释放输入输出数组和数据缓存区内存。对处理完成的信号进行时域到频域的转换,对所得的频域特征采用式 (3) 进行目标方位估算,然后将计算结果保存至 SD 卡。

本系统对声音信号进行 FFT 时将 512 个采样点集成一个观测单位,即为一帧。在不同采样率下,一帧的时间约为 50~100 ms,完成一帧数据采

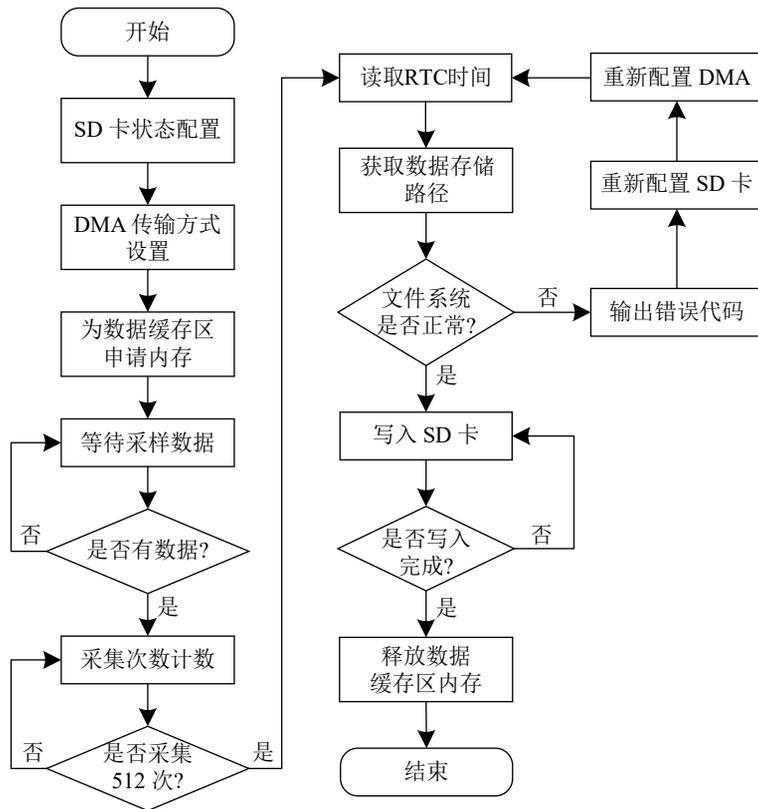


图 7 存储模块流程图
Fig.7 Flow chart of the storage module

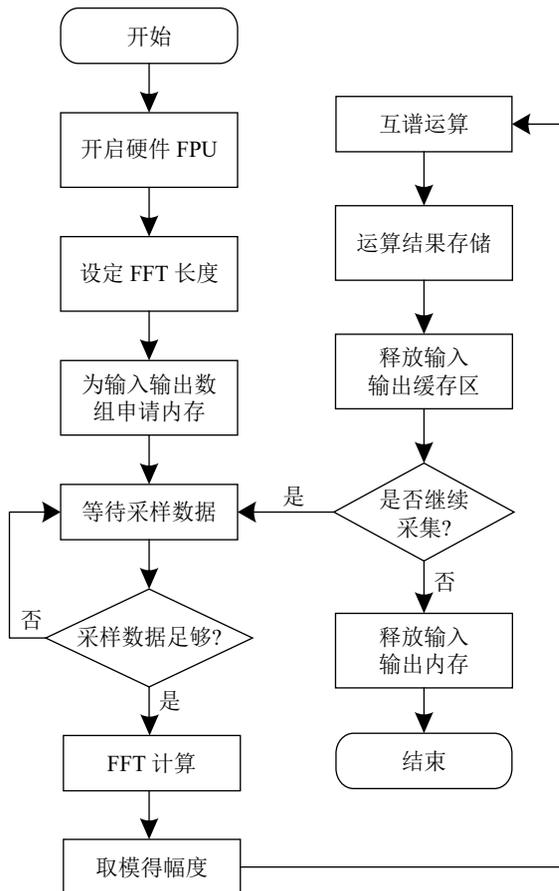


图 8 数据处理流程图
Fig.8 Flow chart of data processing

集后系统运算模块消耗的时间为 3.52 ms。运算结束后若需要进行采集，则开启下一采集运算循环。当主控芯片缓存的各通道数据满足 FFT 运算所需后，利用 FFT 算法计算获取信号的频域信息，然后对结果进行互谱运算来降低噪声信号干扰，增加方位估计的准确性。通过使用主控芯片对 x 和 y 通道所采集数据的互谱运算结果求反正切，结果即为所求方位角。本系统通过使用主控芯片的硬件浮点数处理单元降低 FFT 和互谱运算耗时，使用 SDIO+DMA 方式进行数据存储加快数据写入速度。系统运算流程总耗时较少约为 3.52 ms，满足了方位估计实时性的要求。

4 系统测试与海区实测

系统的信号采集处理系统实物图如图 9 所示。信号采集处理部分主要包括主控单元、AD 采样单元、信号调理单元、SD 卡存储单元、电子罗盘等模块。

4.1 硬件电路测试

为验证系统数据采集性能，在实验室进行采集存储性能测试。实验使用信号发生器作为信号源向系统输入一个电压 20 mV(峰峰值)、频率为 200 Hz 的正弦信号，系统采样率设置为 6.9 kHz。经过信号调理电路对信号进行了 70 倍的放大，经调理电

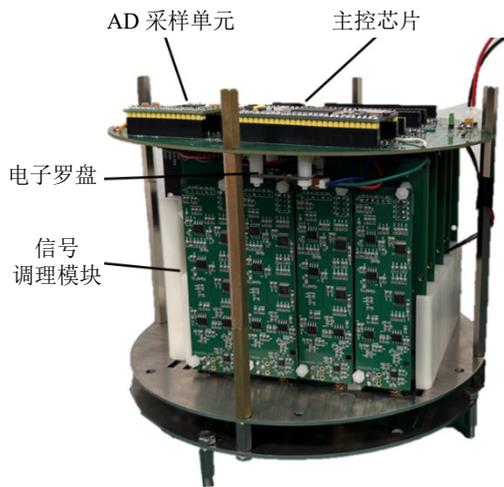


图9 信号采集处理系统实物

Fig.9 Photo of signal sampling and processing system

路后的信号如图10所示。由图10可知，输入信号经过采样、信号调理电路的处理后，SD卡所保存的数据波形平滑、数据稳定。

对本文设计的系统进行功耗测试，在连续采集模式下，进行八通道数据采集、滤波、运算、存储等工作所消耗的总功耗约为1.27 W，完成每个通道工作平均消耗功率约为0.16 W。当使用130 Ah容量的电池组供电，在连续采集存储工作模式下，

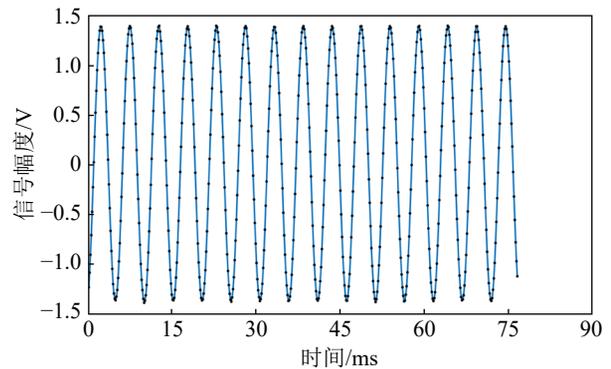


图10 经信号调理后的数据采集结果

Fig.10 Results of sampled data after signal conditioning

执行声压和振速联合分析并进行方位估计，本系统可工作10 d以上。

不同核心处理单元构成的系统功耗对比如表1所示。本文设计的采集系统每通道平均功耗相比文献[16]中以STM32H743为核心的系统降低了48.39%，相比文献[5]中以TMS320C6416为核心的系统降低了75.38%，系统功耗降低效果明显。相比文献[8]中的结构，本系统在实现方位估算和频率分析的同时，平均每通道功耗降低84%，功耗降低效果显著。

表1 不同系统功耗对比表

Table 1 Comparison of power consumption of different systems

采集系统架构	通道数	采样率/kHz	存储容量/ GiB	有无方位 估计	有无频域 分析	系统总 功耗/W	平均每通道 功耗/W
STM32F407+AD7606	8	10	512	有	有	1.27	0.16
STM32H743+ADS1274 ^[16]	4	20	1 024	无	无	1.22	0.31
TMS320C6416+ADS1174 ^[5]	4	52	64	无	无	2.58	0.65
TMS320C6654+XC7A100T+AD1274 ^[8]	4	20	512	有	有	4.00	1.00

注：STM32F407为本文设计系统。

4.2 FFT 算法测试

使用信号发生器作为信号源对系统输入峰峰值为20 mV、频率为200 Hz的正弦信号，对系统所采集到的数据，使用单片机进行FFT频域分析，同时使用STM32内部计时器对系统的算法运行时间计时。经测试，使用本系统对采集的信号进行一次512点FFT运算消耗的时间为0.27 ms，对采集到的8通道AD信号完成FFT运算消耗的时间为2.36 ms。

单片机进行FFT运算结果如图11所示。计算得出的信号频率结果约为200.68 Hz，与原始信号的频率基本相等，误差约为0.34%。因此，本系统FFT算法精度较高、速度较快，可以满足频域处理分析的设计需求。

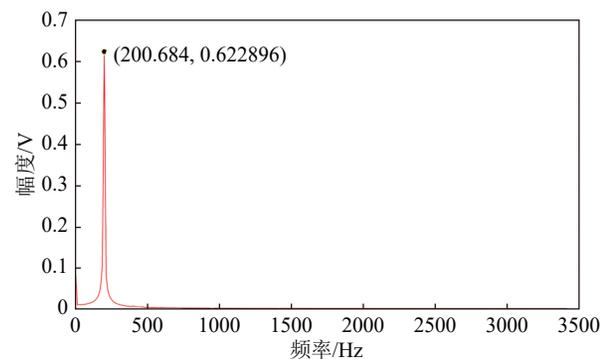


图11 系统采集数据的频域处理结果

Fig.11 Frequency domain results of sampled data

4.3 海上实测

2023年8月，在黄海某海域进行该水听器系统实测，将该系统安装在测量实验船下方对目标船

进行探测。测量船和目标船均装有全球定位系统(global positioning system, GPS)。目标船在附近航行,使用本文设计的系统进行信号探测。实验场地附近水域水深约 15 m,当天气候较佳,附近无其他船只干扰,海上实验期间海况良好。测量实验船如图 12 所示,水听器放置过程如图 13 所示。



图 12 测量实验船

Fig.12 Photo of experimental ship



图 13 水听器放置过程

Fig.13 Process of placing the hydrophone

在整个海上测试过程中,测量系统工作稳定,没有出现异常情况。海上试验的结果表明,本文设计的系统具有较好的稳定性。

在海上测试过程中,GPS 设备可以获取目标船和测量船的实时位置信息。使用 GPS 设备的实时定位数据绘制出的目标船和测量船的相对位置变化曲线如图 14 所示。

试验期间,测量船静止不动,目标船运动方向如图 14 箭头所示。使用 GPS 设备采集到的目标船与测量船的相对方位数据为图 15 中真实方位,可以得到目标船和测量船的方位角度变化曲线。然后将 GPS 测得的真实方位与本文系统测量采集到的信号经过角度估计算法所得数据进行对比,结果如图 15 所示。

经对比,本系统计算的起始方位为 67°(真实方位为 66°),结束方位为 66°(真实方位为 68°),跟踪过程中最大误差 9°,在 9:20:35~9:21:30 期间误差约为 1°。在 9:20:30~9:22:20 期间存在 4°误差。方

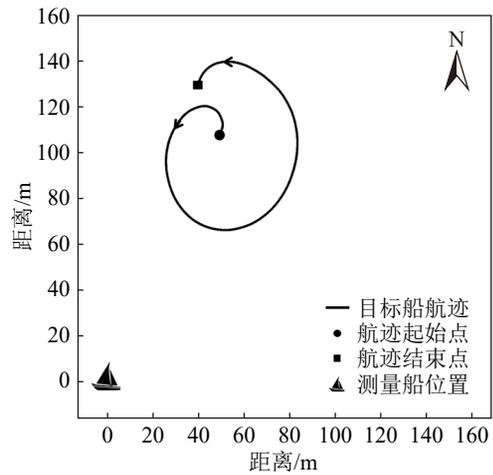


图 14 GPS 记录航迹

Fig.14 The track recorded by GPS

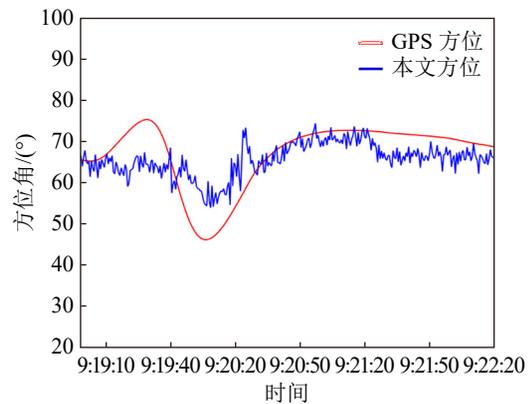


图 15 本文系统测量方位与真实方位对比

Fig.15 Comparison of real azimuth and measured azimuth with the designed system in this paper

位估计的均方根误差为 3.8°。经过海上实测,该采集系统和方位测量算法可以实现方位估计功能。误差主要由目标船和测量船在海上存在轻微晃动导致。

5 结论

本文设计了一种低功耗、自容式、多通道实时运算的矢量水听器,实现了八通道高速采集、大容量 DMA 快速存储,对系统功耗、信号的频域处理进行了测试,同时也对方位估计功能进行了海试。试验结果表明,该系统性能良好,工作稳定,可实现对矢量水声信号的多通道高速采集、存储和探测处理。本系统研究不仅为矢量水听器信号的长时间多通道同步采集、存储、特征提取和目标探测与识别奠定了良好的平台基础,也为多路标量水听器阵列的低功耗采集与信息处理提供了技术支撑。

参 考 文 献

[1] 罗德猛,徐海东,胡长青,等.一种可用于自容式水听器的信号

- 采集电路设计[J]. 声学技术, 2023, **42**(3): 306-313.
- LUO Demeng, XU Haidong, HU Changqing, et al. A design of signal acquisition circuit for self-contained hydrophone[J]. *Technical Acoustics*, 2023, **42**(3): 306-313.
- [2] 陈阳, 王锦霞, 余赟. 局部置信度增强的单矢量水听器互谱方位直方图[J]. 声学技术, 2022, **41**(4): 608-612.
- CHEN Yang, WANG Jinxia, YU Yun. Local confidence level enhanced cross-spectral DOA histogram of single vector hydrophone[J]. *Technical Acoustics*, 2022, **41**(4): 608-612.
- [3] 马艳, 罗斌, 邵杨梦. 一种单矢量水听器通道增益一致性分析方法[J]. 声学技术, 2022, **41**(4): 624-629.
- MA Yan, LUO Bin, SHAO Yangmeng. A channel gain consistency analysis method for single vector hydrophone[J]. *Technical Acoustics*, 2022, **41**(4): 624-629.
- [4] 李晨歌, 张国军, 朱珊, 等. 自容式水听器的设计与实现[J]. 国外电子测量技术, 2021, **40**(6): 120-124.
- LI Chen'ge, ZHANG Guojun, ZHU Shan, et al. Design and implementation of self contained hydrophone[J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2021, **40**(6): 120-124.
- [5] 贾启航. 基于 TMS320C6000 的自容式数据存储与处理平台[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.
- JIA Qihang. A self-contained data storage and processing platform based on TMS320C6000[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2018.
- [6] 赵宝平, 王茂法, 王佳楠, 等. 水下滑翔机声学测量系统的低功耗采集存储系统设计[J]. 声学技术, 2021, **40**(3): 353-357.
- ZHAO Baoping, WANG Maofa, WANG Jianan, et al. Design of low-power consumption acquisition and storage system for acoustic measurement system of underwater glider[J]. *Technical Acoustics*, 2021, **40**(3): 353-357.
- [7] 张一凡, 张国军, 荆博原, 等. 基于 STM32 的 MEMS 矢量水听器实时定向系统[J]. 仪表技术与传感器, 2022(5): 77-81.
- ZHANG Yifan, ZHANG Guojun, JING Boyuan, et al. MEMS vector hydrophone real-time orientation system based on STM32[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2022(5): 77-81.
- [8] 吕勇, 马士全, 孙巍, 等. 单矢量水听器信号采集与处理系统设计[J]. 国外电子测量技术, 2022, **41**(2): 71-77.
- LYU Yong, MA Shiquan, SUN Wei, et al. Design of signal acquisition and processing system based on single vector hydrophone[J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2022, **41**(2): 71-77.
- [9] 王文龙, 王超, 韩梅, 等. 矢量水听器在水下滑翔机上的应用研究[J]. 兵工学报, 2019, **40**(12): 2580-2586.
- WANG Wenlong, WANG Chao, HAN Mei, et al. Research on application of vector hydrophone onboard an underwater glider[J]. *Acta Armamentarii*, 2019, **40**(12): 2580-2586.
- [10] 李超. 矢量水听器接收与处理平台设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2014.
- LI Chao. Design of receiving and processing platform for vector hydrophone[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2014.
- [11] 张月, 陶林伟. 基于 FPGA 与 STM32 的多通道数据采集系统[J]. 西北工业大学学报, 2020, **38**(2): 351-358.
- ZHANG Yue, TAO Linwei. Multi-channel data acquisition system based on FPGA and STM32[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2020, **38**(2): 351-358.
- [12] 范君健, 吴国东, 王志军, 等. 基于 FPGA+STM32 的多通道数据采集系统设计[J]. 兵器装备工程学报, 2017, **38**(12): 281-286.
- FAN Junjian, WU Guodong, WANG Zhijun, et al. Design of multi-channel data acquisition system based on FPGA and STM32[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2017, **38**(12): 281-286.
- [13] 杨德森, 洪连进. 矢量水听器原理及应用引论[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [14] 梁斌. 基于 MEMS 矢量水听器的信号处理与 DOA 估计[D]. 太原: 中北大学, 2017.
- LIANG Bin. Research result for direction of arrival estimation based on MEMS acoustic vector sensors[D]. Taiyuan: North University of China, 2017.
- [15] 韩梅, 孙相杰, 孙芹东, 等. 矢量水听器性能参数测试及分析[J]. 声学技术, 2015, **34**(3): 287-290.
- HAN Mei, SUN Xiangjie, SUN Qindong, et al. Parameter measurement and analysis of vector hydrophones[J]. *Technical Acoustics*, 2015, **34**(3): 287-290.
- [16] 时胜国, 杨德森. 矢量水听器的源定向理论及其定向误差分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2003, **24**(2): 132-135.
- SHI Shengguo, YANG Desen. Acoustic source location by acoustic vector-sensor and its bearing error[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2003, **24**(2): 132-135.
- [17] 笪良龙, 侯文姝, 孙芹东, 等. 单矢量水听器估计目标方位的方法与实验[J]. 应用声学, 2015, **34**(6): 516-525.
- DA Lianglong, HOU Wenshu, SUN Qindong, et al. An experiment on azimuth estimation of target by single vector hydrophone[J]. *Journal of Applied Acoustics*, 2015, **34**(6): 516-525.
- [18] 魏志强, 王英民, 苟艳妮, 等. 单向水听器及其在波束形成中的应用[J]. 声学技术, 2014, **33**(6): 572-576.
- WEI Zhiqiang, WANG Yingmin, GOU Yanni, et al. Unidirectional hydrophone and its application in beamforming[J]. *Technical Acoustics*, 2014, **33**(6): 572-576.
- [19] 何光进, 程锦房, 李楠, 等. 单矢量水听器方位频率联合估计新方法[J]. 声学技术, 2013, **32**(3): 238-242.
- HE Guangjin, CHENG Jinfang, LI Nan, et al. A new method of DOA and frequency estimation based on a single vector hydrophone[J]. *Technical Acoustics*, 2013, **32**(3): 238-242.
- [20] 梁国龙, 张锴, 范展, 等. 单矢量传感器 MUSIC 算法的 DOA 估计及性能评价[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2012, **33**(1): 30-36.
- LIANG Guolong, ZHANG Kai, FAN Zhan, et al. Performance evaluation of DOA estimation using a single acoustic vector-sensor based on an improved MUSIC algorithm[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2012, **33**(1): 30-36.
- [21] 孙巍, 孙芹东, 马士全, 等. STM32H743 系列水声数据采集存储系统设计与实现[J]. 电子测量技术, 2021, **44**(16): 98-102.
- SUN Wei, SUN Qindong, MA Shiquan, et al. Design and implementation of STM32H743 series underwater acoustic data acquisition and storage system[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2021, **44**(16): 98-102.