

低功耗矢量水声信号采集处理系统设计与实现^{*}

孙巍^{1,2,3} 袁猛^{1,2} 王文龙^{1,2} 王超^{1,2} 孙芹东^{1,2,4}

(1. 海军潜艇学院 青岛 266199; 2. 崂山实验室 青岛 266237;

3. 青岛协同创新研究院 青岛 266071; 4. 天津大学 天津 300072)

摘要:为进一步降低矢量水听器信号采集处理系统对水下滑翔机平台的续航影响,设计了一种以 ARM 和 DSP 为核心控制器的低功耗信号采集处理系统。利用 ARM 控制器实现系统的多种工作模式,以达到不同状态下的最佳功耗控制。此外,在控制软件中加入必要的优先级设计和流水线设计,以提高系统硬件控制效率,最后利用功率测试仪对系统不同工作模式进行测试。结果表明,低功耗模式下平均功耗约为 1.27 W,实时处理模式下平均功耗约为 4.29 W。在长时间连续工作情况下,可大幅度降低实时处理模式的工作时间占比,功耗控制效果显著,有效证明了该方案的有效性和优越性。

关键词:矢量水听器;嵌入式系统;数据采集存储;低功耗;流水操作

中图分类号: TP274.2; TN791 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

Design and implementation of a low power vector underwater acoustic signal acquisition and processing system

Sun Wei^{1,2,3} Yuan Meng^{1,2} Wang Wenlong^{1,2} Wang Chao^{1,2} Sun Qindong^{1,2,4}

(1. Navy Submarine Academy, Qingdao 266199, China; 2. Laoshan Laboratory, Qingdao 266237, China; 3. Qingdao Institute of Collaborative Innovation, Qingdao 266071, China; 4. Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: To further reduce the impact of vector hydrophone signal acquisition and processing systems on the endurance of underwater glider platforms, a low-power signal acquisition and processing system with ARM and DSP as core controllers was designed. Achieve multiple operating modes of the system by utilizing ARM controllers, in order to achieve optimal power consumption control in different states. In addition, necessary priority design and pipeline design are added to the control software to improve the hardware control efficiency of the system. Finally, different working modes of the system are tested using a power tester. The results show that the average power consumption in low-power mode is about 1.27 W, and the average power consumption in real-time processing mode is about 4.29 W. In the case of long-time continuous operating, the proportion of real-time processing mode operating time can be significantly reduced, and the power control effect is significant, which effectively proves the effectiveness and superiority of this scheme.

Keywords: vector hydrophone; embedded system; data acquisition and storage; low power consumption; pipeline operation

0 引言

近些年,随着对海洋开发与研究的不断深入,水下无人平台在海洋资源勘探、海洋环境监测、海洋生态调查等领域的应用呈现出了快速增长的趋势。为了实现对目标海域的长时观测,部署时长的需求不断提高,这对水下无

人平台续航能力提出了更高的要求。

浮标^[1-2]、潜标^[3]、水下滑翔机^[4]等小型水下无人平台由于自身的尺寸和带载能力等条件限制,其可携带能源相对有限,当搭载声学载荷进行目标跟踪探测时其续航能力将受到较大影响,因此,开展对声学载荷系统功耗的优化工作十分必要。

收稿日期:2023-11-15

^{*} 基金项目:国家重点研发计划(2021YFC3100903)、山东省重点研发计划(2021CXGC010708)、青岛协同创新研究院创新计划(LYY-2022-04)项目资助

声学载荷系统通常包括声学换能器和采集处理单元^[5-7],其中采集处理单元需要根据功能和指标要求进行定制设计,在功耗方面,目前主要采用以低功耗处理器为控制核心,实现对系统自身或其他功能模块的掉电或唤醒。邢攸广等^[8]利用STM32F1系列微控制器设计实现了一种基于潜标的水声信号数据采集系统,结合ADS1274模数转换器和SD卡实现对矢量水听器水声信号的采集与存储,总功耗约为1.2W,但该功耗值存在一定的不准确性,在功耗测试过程中使用万用表对主要功能模块静态功耗进行了粗略测量和估算,不能反应系统动态过程的实时功耗情况。Fischell等^[9]使用一种自主式水下航行器(autonomous underwater vehicle,AUV),开展了接收海底静态目标的静态声散射数据试验,在AUV中部利用两块24DSI12-PLL数据采集板对放大滤波后的阵列模拟信号进行24bit模数转换和37.5kHz采样率的数据采集,由于平台内部各模块采用半定制产品,整体功耗较高,无法实现单次水下长时间部署。Song等^[10]利用STM32L系列微控制器设计实现了一种可应用于浮标内部的数据采集存储系统,在非必要工作时间内,使微控制器进入待机模式,同时控制所搭载的其他传感器立即进入休眠状态,实现数据采集系统的间歇性工作。邵清等^[11]利用STM32L4系列微控制器设计实现了一种超低功耗水下值守系统,采用快速傅里叶算法对水声信号进行实时处理,通过比较单个频点或多个频点的数值与预设门限之间的大小来筛选有用信号,实现将系统功耗降至7.30mW,但没有结合相关水下设备证明该系统的实际应用效果。Aniceto等^[12]利用搭载水听器的水下滑翔机在挪威北部开展了水下生物和环境数据采集,使用了一种低功耗的数据记录单元,实现了较长时间的原始声学数据采集,讨论了低功耗设计对平台续航的重要性。Wang等^[13]在南海多次开展了声学目标探测试验,在集成单矢量水听器的水下滑翔机中应用了一种基于DSP+FPGA的信号采集处理系统,整体功耗约为9W,连续工作情况下对平台续航影响较大。Yu等^[14]研制了一种大动态范围水声信号记录装置,主要针对接收、放大、采样等硬件电路进行改进,实现在低功率模式下对水下生物和海上工程等噪声的实时监测。罗德猛等^[15]使用ZYNQ7020系列设计实现了一种可用于自容式水听器的信号采集存储系统,利用PL部分实现信号采样率可调,其模拟电路在不同采样率下的功耗具有一定的动态范围,最终通过估算得到系统总功耗约为2W,但没有结合具体应用试验给出动态功耗的测试结果。

从国内外小型水下无人平台在声学数据采集方面的应用情况可以看出,声学载荷的低功耗设计对平台保持原有续航的作用十分显著,本文在文献[16]的基础上,进一步针对水下滑翔机平台声学载荷低功耗应用需求,设计一种以ARM+DSP为核心处理器的矢量水声信号采集处理系统,以达到不同状态下的最佳功耗控制,下面分别从

系统的架构设计、硬件设计和软件设计进行详细介绍。

1 系统架构设计

本文所设计的信号采集处理系统主要应用于一种搭载单矢量水听器的水下滑翔机^[17],系统装置于滑翔机前导流罩内的耐压舱体中,在尺寸上需要满足直径小于80mm,高度小于100mm。系统前端通过水密线缆接收矢量水听器的声压P标量信号和振速X、Y、Z矢量信号,后端通过水密线缆与滑翔机平台主控进行串口通信和供电。系统主要实现的功能如下:1)对矢量水听器4路模拟信号进行滤波放大,并完成20Ksps的24bit高精度实时采集;2)通过串口与滑翔机主控完成指令控制、信息交互;3)通过串口接收姿态传感器实时数据,并完成动平台干扰自适应补偿;4)每秒内完成目标方位估计算法、基于特征提取的目标识别算法等数据处理;5)具备多种存储模式,实时存储原始数据、处理结果数据以及平台信息数据;6)能够与PC上位机软件建立网络连接,完成信息交互和数据高速上传。

在实际部署过程中,水下滑翔机在不同工作情况下,可通过串口下发配置指令,调整信号处理系统工作模式,系统主要工作模式包括待机模式、低功耗模式和实时处理模式,滑翔机在准备启动过程中同时为声学系统上电,系统上电后首先进入待机模式,当水下滑翔机进入工作深度后采用低功耗模式进行环境噪声采集和目标噪声功率检测,当检测有声学目标靠近时系统进入实时处理模式对目标噪声进行连续方位处理和识别处理。其中待机模式下系统仅保持与平台的通信功能;低功耗模式下系统保持矢量水声数据的采集与存储,同时进行目标噪声功率计算;实时处理模式下ARM与DSP同步进行工作,完成实时采集、存储和处理。根据以上的平台应用情况和功能分析,系统总体架构设计如图1所示,其中ARM处理器主要负责物理层中的硬件控制,在驱动层需要进行整体的控制流程设计和各硬件控制器设计;DSP处理器作为从机,由

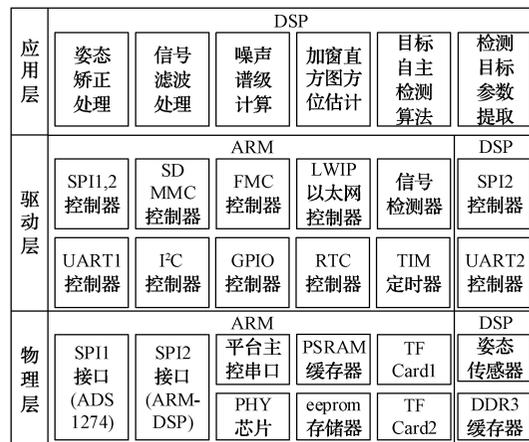


图1 系统总体架构

Fig. 1 Overall system architecture

ARM 端控制上电以及工作的启停。

2 系统硬件设计

为了兼顾处理性能与能耗要求,系统 ARM 核心控制器选用 STM32H743II-K6,该芯片最高工作频率可达到 480 MHz,其核心工作频率可通过软件进行配置,其 GPIO 可编程引脚可实现其他外接功能模块的供电管理。此外,该芯片还配备多种标准接口,主要包括 SPI 接口、I²C 接口、UART 接口、SDMMC 接口、FMC 接口以及以太网接口,能够满足任务需求,各接口内部工作时钟可通过软件完成开关控制。DSP 核心处理器选用德州仪器 TMS320C6654,在 850 MHz 工作频率下内核浮点运算能力可达到 13.6 GFLOP,可以满足数据实时处理要求,系统硬件组成如图 2 所示。

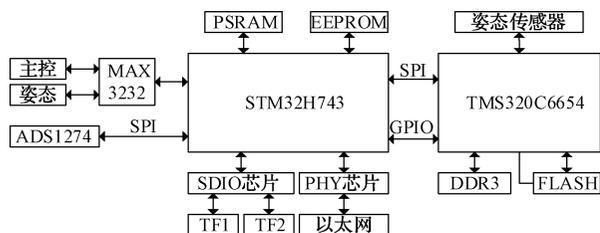


图 2 系统硬件组成

Fig. 2 Diagram of system hardware composition

为了兼顾系统的小型化和可扩展性,根据系统总体架构中的功能层次划分,系统硬件结构采用叠层设计方式,主要功能模块分别独立集成于各层电路模块,包括外设拓展接口模块、平台供电处理模块、模拟信号处理模块、ARM 硬件控制模块以及 DSP 数据处理模块,系统实物结构如图 3 所示。

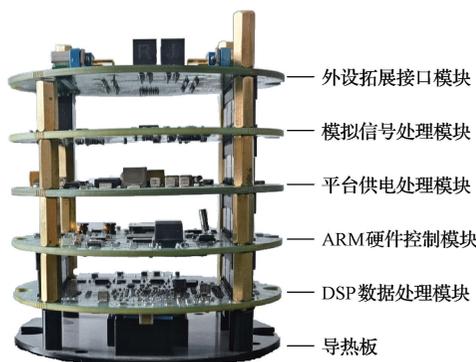


图 3 系统实物结构

Fig. 3 Photo of system physical structure

外设拓展接口模块主要集成系统外围设备的通信接口,主要包括姿态传感器通信串口、平台通信串口、矢量水听器信号接口,以太网口以及调试接口,该模块可配合不同平台进行独立设计,实现接口模块快速替换。

模拟信号处理模块主要集成模拟信号滤波放大电路

和 ADS1274 模数转换电路。以 ADS1274 转换器为核心采集器件,配合前端的模拟放大滤波电路完成矢量水听器模数转换和数据采集,主要功能器件包括运算放大器、ADS1274 模数转换器以及降压稳压器件。

ARM 硬件控制模块以 STM32H7 系列微控制器为核心,用于控制物理层中的各种接口和功能器件,主要功能器件包括 STM32H7 处理器、MAX3232 芯片、PSRAM 缓存芯片、EEPROM 芯片、以太网 PHY 芯片、2 片 512 GB TF 卡以及其他辅助器件。

DSP 数据处理模块以 TMS320C6654 处理器为处理核心,结合姿态传感器实时处理 ARM 驱动层提交的矢量水听器原始采集数据,主要功能器件包括 TMS320C6654 处理器、DDR3 芯片、FLASH 芯片以及其他辅助器件。

3 系统软件设计

在满足任务功能的基础上,为了提高硬件控制效率,根据外围硬件控制特点以及工作流程,在 ARM 端独立设计了一套实时性较高的任务优先级,将部分硬件处理放在中断触发后优先处理,同时对任务流程进行分割,在 ARM 和 DSP 中分别设计多级流水线,以最大化的实现 ARM 与 DSP 之间的并行工作。

3.1 工作模式设计

根据应用需求,系统主要工作模式包括待机模式、低功耗模式和实时处理模式,在上电初始化阶段优先对主控串口进行初始化,并完成串口中断接收配置,等待平台发送启动命令后,继续完成其他外设控制器初始化,以降低片内其他外设控制器时钟启动后对功耗的影响。

在低功耗模式下系统 ARM 端每秒主要完成 4 路矢量水声信号实时采集、PSRAM 读写、eeprom 芯片写入、TF 卡数据写入以及串口发送。由于 DSP 端功耗较高,为了减少在无目标状态下的系统功耗,对上一秒缓存数据进行噪声功率计算,构建信号噪声功率检测器 $\hat{\sigma}_s^2$ ^[18],如式(1)所示,通过与设定阈值进行比较,判断是否需要开启 DSP 进行数据处理。

$$\hat{\sigma}_s^2 = \frac{1}{2(\hat{\alpha} + 1)} \cdot tr(\hat{\mathbf{R}}) \tag{1}$$

$$\hat{\mathbf{R}} = \frac{1}{L} \begin{bmatrix} \sum p_i^2 & \sum p_i v_{xi} & \sum p_i v_{yi} \\ \sum p_i v_{xi} & \sum v_{xi}^2 & \sum v_{xi} v_{yi} \\ \sum p_i v_{yi} & \sum v_{xi} v_{yi} & \sum v_{yi}^2 \end{bmatrix} \tag{2}$$

$$\hat{\alpha} = \sqrt[3]{\left(\frac{1}{k} - 1\right) \cdot \left(1 + \frac{1}{\sqrt{k}}\right)} + \sqrt[3]{\left(\frac{1}{k} - 1\right) \cdot \left(1 - \frac{1}{\sqrt{k}}\right)} - 1 \tag{3}$$

$$k = 1 - \frac{tr(\hat{\mathbf{R}})^3}{32det(\hat{\mathbf{R}})} \tag{4}$$

式中： \hat{R} 为矢量水听器输出协方差矩阵的最大似然估计； $\hat{\alpha}$ 为环境噪声功率与目标噪声功率的估计比率。

在实时处理模式下系统 ARM 端在低功耗模式基础上增加与 DSP 之间 SPI 通信,控制 GPIO 上电引脚为 DSP 上电。DSP 初始化后,通过 SPI 接收实时采集数据进行后续的计算处理,处理结束后将结果通过 SPI 回传到 ARM 端。

3.2 优先级设计

系统每秒需要处理 20K 次来自 ADS1274 的 GPIO 中断,此外还要处理主控串口、DSP SPI (DMA)接口、SDMMC (DMA)接口、定时器和以太网接口等硬件中断,为了保证系统各任务之间的实时性,根据各硬件中断特点设计了中断优先级和任务序列,通过在每种中断任务回调处理过程中加入必要的处理流程,以提高系统中断任务的执行效率,相比于操作系统处理中断任务的效率更高,系统中断优先级及任务序列如图 4 所示。为了优先保证数据采集的功能稳定,将 ADS1274 的 DRDY 发出的 GPIO 中断优先级设为最高级 L0,并在 GPIO 中断中完成 ADS1274 的数据解码以及向 PSRAM 的数据搬移。其次,当中断次数达到 20 480 时标记当前帧采集完成,即前 1 帧数据采集

结束,启动 SPI DMA 数据发送,向 DSP 传输 320 KB 的原始数据,由于 DSP 端 SPI 最大接收长度有限,单次传输长度设为 32 KB,连续启动 10 次完成发送,为了保证每次发送之间的时间间隔最小,将 SPI TX DMA 优先级设为 L1,并在 SPI DMA 发送完成中断中重新配置下一次发送参数。当 DSP 完成数据处理后需要通过 SPI 将 2 KB 数据结果回传到 ARM,为了优先完成数据打包,将 SPI RX DMA 优先级设为 L2,并在 SPI DMA 接收中断中将结果数据搬移至 PSRAM 中当前帧的对应缓存位置。此外,系统在每帧中间还需要接收来自主控的串口信息,由于时间不确定并且信息字节数较少,将 UART RX IT 优先级设为 L3。当前数据包信息更新完成后启动 TF 卡 DMA 写操作,由于 STM32H743 的 SDMMC 控制器内部嵌入独立的 DMA,不需要单独控制 DMA 通道,在 TF 卡写完成中断中清除相应标志位,优先级设为 L4。最后利用两个定时器分别用于恢复串口异常和 TF 读写异常,优先级分别设为 L5 和 L6。由于网络接收中断只有在系统与 PC 连接情况下才会出现,并且与上位机之间指令交互具有随机性,其优先级设为 L7。

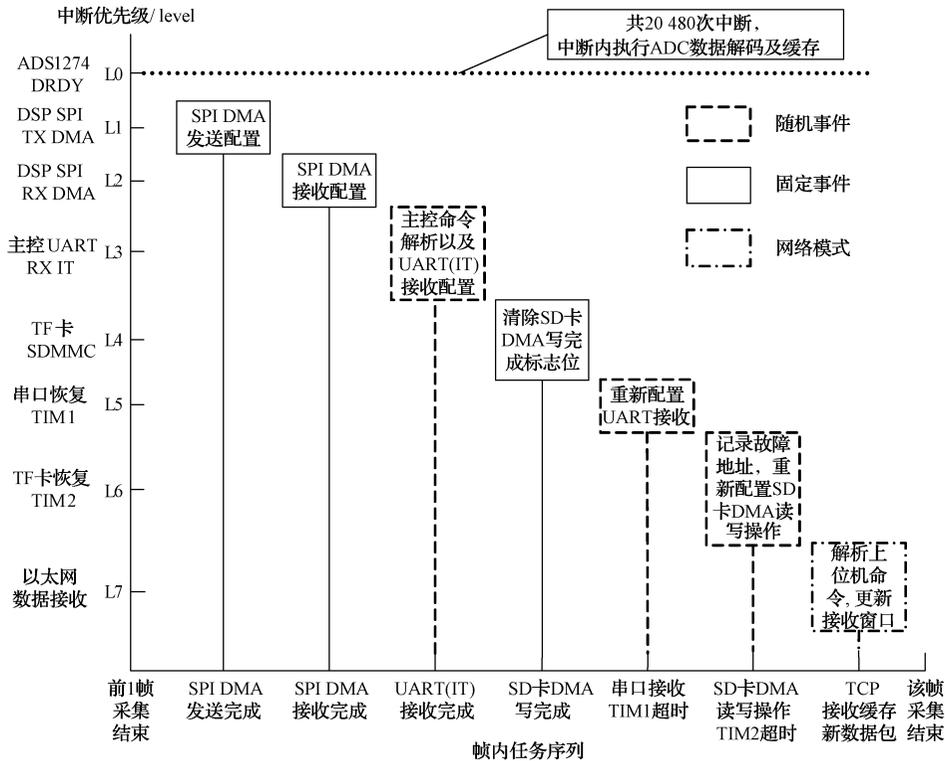


图 4 系统中断优先级及任务序列

Fig. 4 System interrupt priority and task sequence

3.3 流水线设计

为了使得 ARM 在接收 DSP 处理结果过程中不等待 DSP 处理过程,在 ARM 和 DSP 的主控制流程中分别采用三级流水线和两级流水线,并通过 GPIO 和 SPI 进行两

者之间同步控制,流程如图 5 所示。

系统接收到开始命令后,开启 GPIO 中断,接收 ADS1274 的 DRDY 触发信号,在第 1 帧中只完成数据采集,在第 2 帧开始时继续进行数据采集,并通过 GPIO 中

帧周期/s	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	...
	A1	A2	A3	A1	A2	A3	A1				
ARM端操作	×	B1	B2	B3	B1	B2	B3	B1			
	×	×	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1		
DSP端操作	×	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1			
	×	×	E1	E2	E1	E2	E1	E2	E1		

A1-第 $3n+1$ 帧数据采集,A2-第 $3n+1$ 帧数据发送,A3-第 $3n+1$ 帧结果接收;
B1-第 $3n+2$ 帧数据采集,B2-第 $3n+2$ 帧数据发送,B3-第 $3n+2$ 帧结果接收;
C1-第 $3n+3$ 帧数据采集,C2-第 $3n+3$ 帧数据发送,C3-第 $3n+3$ 帧结果接收;
D1-第 $2m+1$ 帧数据接收和处理,D2-第 $2m+1$ 帧数据结果回传;
E1-第 $2m+2$ 帧数据接收和处理,E2-第 $2m+2$ 帧数据结果回传。

图5 ARM与DSP交互流水操作

Fig. 5 ARM and DSP interactive pipelining operation

断通知 DSP 准备数据接收,然后启动 SPI DMA 发送,将第 1 帧数据发送到 DSP,同时 DSP 在接收到 GPIO 中断后,开始接收数据,并进行算法处理,处理结果保存至外部 DDR3。在第 3 帧开始时同样继续数据采集和第 2 帧数据发送,然后启动 SPI DMA 接收,接收第 1 帧的数据处理结果,并完成后续的数据存储,之后循环重复至接收到停止命令。当接收到停止命令后,为了保证结束帧数据采集完整,在当前帧采集结束时停止采集。

4 实验与结果

为了准确测量和比较系统不同模式的实时功耗,选用了一款安服优 F-11 高精度功率测量仪,电流测量精度为 $1\ \mu\text{A}$,电压测量精度为 $1.25\ \text{mV}$,该测量仪采用非隔离采样,与负载设备共地,其电压表等效内阻为 $860\ \text{k}\Omega$,采样精度为 16 bit,电流表压降不超过 $82\ \text{mV}$,可通过串口将电流和电压测量结果发送至上位机,其发送间隔可设定在 $10\ \text{ms}\sim 10\ \text{s}$,可以满足本文系统动态功耗测试需求。为了消除电压波动对系统功率测试的影响,选用一款 ITECH 可编程直流电源为系统提供稳定的 $20\ \text{V}$ 恒定电压,这样也使得测试结果中功率数据与电流数据相差固定

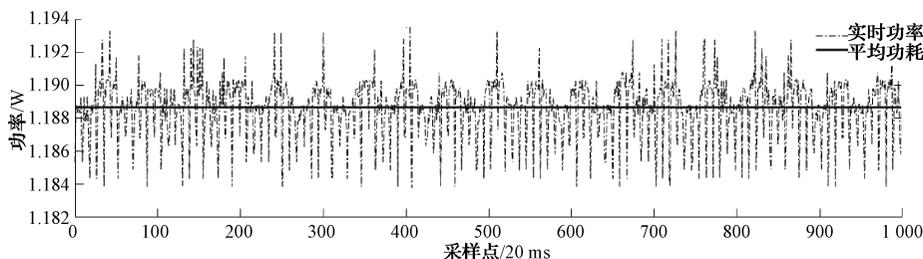


图7 待机模式的实时功率及平均功率

Fig. 7 Real-time power and average power in standby mode

上位机发送启动指令,使得系统进入低功耗模式,在低功耗模式下系统在待机模式的基础上完成其他控制器的时钟启动及配置,控制外围硬件进行 4 路矢量水声信号实时采集、PSRAM 读写、eeprom 芯片写入、TF 卡数据写入以及串口发送,同时实时进行信号功率检测,得到的实时功率如图 8 所示。从图 8 可

以看出,系统功耗具有一定的周期性,平均功率为 $1.27\ \text{W}$,整体功耗相较于待机模式稍有提高,通过工作流程对比,每个周期内的 TF 卡和 eeprom 芯片的写入过程中系统电流明显增大,实时功耗达到 $1.54\ \text{W}$ 左右,可以看出 ARM 控制器在功耗控制方面的优越性。

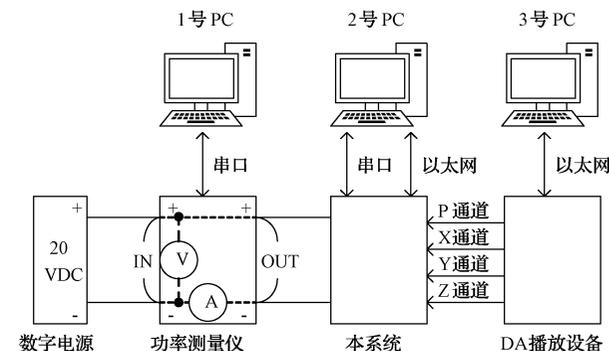


图6 测试环境搭建及设备连接示意图

Fig. 6 Diagram of testing environment setup and equipment connection

其中 1 号 PC 用于接收功率测试仪串口发送的实时数据,串口回传间隔设定为 $20\ \text{ms}$,每秒内同步采集 50 次系统的电压和电流,经过数据处理,最后得到实时功率曲线和平均功率;2 号 PC 通过串口和以太网口连接本系统,用于控制系统的工作启停和数据下载,逐一解析各帧数据包,得到待检测帧帧号;3 号 PC 用于控制一款定制的 4 通道 DA 播放设备,选择一段已经过本系统采集的带有航船噪声的原始数据文件进行播放,向系统的 4 通道信号采集接口输出音频信号,用于模拟实际海上目标探测过程中的真实环境噪声。

4.1 待机与低功耗模式功耗测试

系统在上电后首先完成主控串口初始化以及中断接收配置,进入待机模式。利用上位机串口模拟平台指令与系统之间保持交互,得到的实时功率如图 7 所示,系统平均功率为 $1.19\ \text{W}$ 。

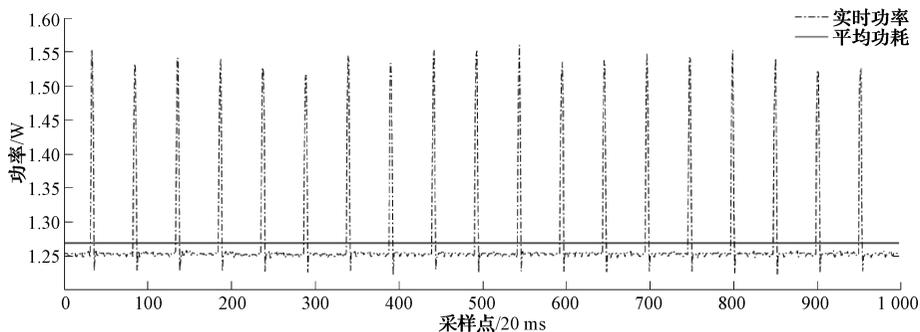


图8 低功耗模式的实时功率及平均功率

Fig. 8 Real-time power and average power in low-power mode

4.2 实时处理模式功耗测试

为了有效测试系统的全工作流程,将 DA 播放设备的 4 路输出接口连接至系统的 4 路输入通道,在 3 号 PC 上选择已采集的噪声数据文件,控制 DA 播放设备进行音频信号播放。同时在 2 号 PC 上利用上位机软件控制系统启动工作,连续采集一段时间后将数据导出至 2 号 PC,得到采集后的目标方位历程和目标噪声功率分别如图 9、10 所示。

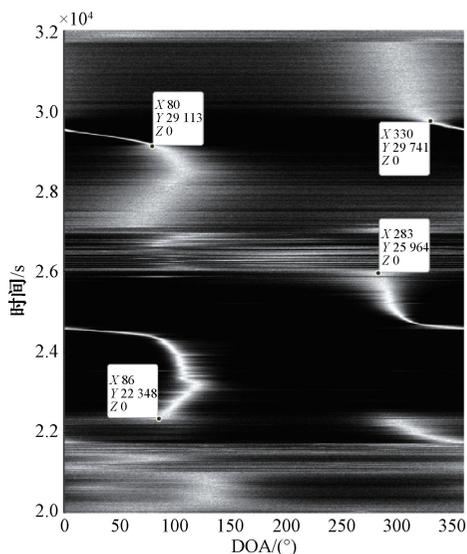


图9 每帧数据的目标方位估计结果

Fig. 9 Target bearing estimation results for each frame of data

从图 9 可以看出,系统所采集的数据能够有效还原目标方位历程,可以说明系统的数据采集、处理、存储、上传等功能均正常。此外,20 000~32 000 帧连续接收到 2 个目标噪声信号,从信号能量强度可以看出,第 1 个目标比第 2 个目标距离平台更近,本次检测器阈值设定为 105.32 dB,从图 10 可以看出,所有超过 105.32 dB 的帧中均被标记为待检测帧。对比图 9 的目标方位历程可以看出,被标记区间能够包含目标方位跟踪过程,第 1 个目

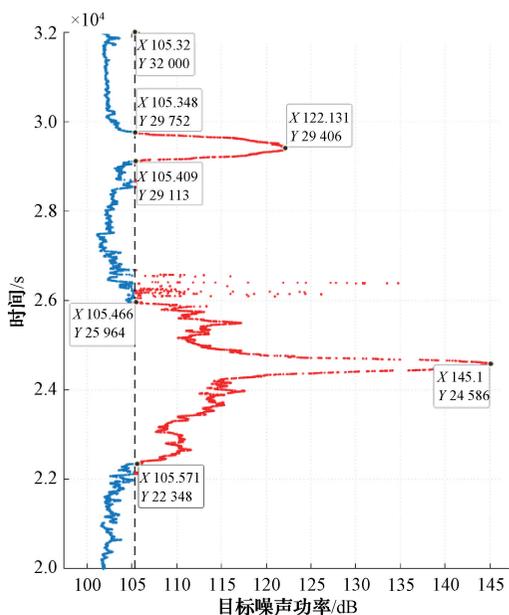


图10 105.32 dB 阈值下的目标噪声功率检测结果

Fig. 10 Target noise power detection results at a threshold of 105.32 dB

标的噪声强度比第 2 个目标的噪声强度更高,与实际情况的结果一致,可以说明在阈值选取合适的条件下检测器可以有效启动工作。

在该段时间内,系统共两次进入实时处理模式,工作总时长为 4 255 s,其中实时处理模式的实时功率情况如图 11 所示,平均功耗为 4.29 W。低功耗模式工作总时长为 7 745 s,整体平均功耗为 2.23 W,整体实时功耗如图 12 所示,可以看出随着低功耗模式工作时间占比的增大,平均功耗将逐渐趋近于低功耗模式。

在主要功能方面,Wang 等^[13]采用的基于 DSP+FP-GA 的信号采集处理系统与本文系统基本相同,其 FPGA 设计部分选用 Artix-7 系列作为主控制器,控制 ADS1274、2 片 DDR3 和 4 片 eMMC,以实现矢量水听器 4 路信号的采集与存储,DSP 设计部分采用 TMS320C6657 双核处理器,以全时工作方式对采集数据进行实时处理,整

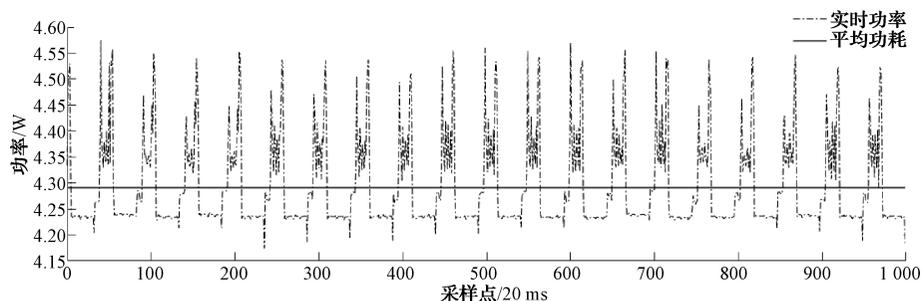


图 11 实时处理模式的实时功率及平均功率

Fig. 11 Real-time power and average power in real-time processing mode

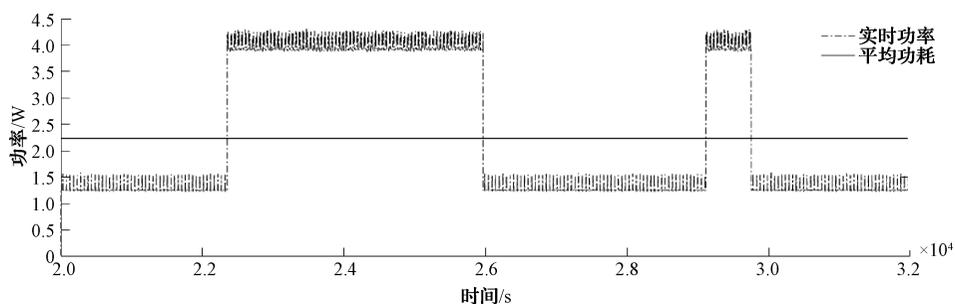


图 12 声学目标探测过程的实时功耗及平均功率

Fig. 12 Real-time power and average power in the course of detecting acoustic targets

体功耗水平较高。与其相比,本文所提出的设计方案,一方面,可使得系统的平均功耗更低,最低可降至 1.27 W;另一方面,可使得系统能够根据目标探测状态自主调整工作模式,有效实现功耗控制。

5 结论

本文针对单矢量水听器水下滑翔机声学载荷应用需求,设计了一种以和 DSP 为核心处理器的低功耗信号采集处理系统,利用 ARM 端的实时控制和低功耗优势,实现硬件高效控制以及多种工作模式,测试结果表明本文系统能够完成实时采集、存储和处理,并且可根据目标探测状态自主调整工作模式,有效实现功耗控制。目前该系统已小批量生产,并应用于小型水下工作平台。下一步的工作重点是根据任务指标进一步分析所需的硬件资源,选择更具优势的控制,在系统中集成电流、电压测量器件,开展系统实时工作任务中模块功耗的量化评估,进一步优化完善系统功耗控制方案设计。

参考文献

- [1] 江帆,魏兆强,马昕,等.低功耗双处理器漂流浮标系统[J].海洋技术学报,2023,42(5):44-55.
JIANG F, WEI ZH Q, MA X, et al. Low power dual processor drifting buoy system[J]. Journal of Ocean Technology, 2023, 42(5): 44-55.
- [2] 马全党,谢娜,焦战立,等.海洋资料浮标多源耦合

供电装置的设计与研究[J].自动化与仪表,2019,34(7):54-58.

MA Q D, XIE N, JIAO ZH L, et al. Design and research of multi-energy power supply device for ocean data buoy[J]. Automation & Instrumentation, 2019, 34(7): 54-58.

- [3] 沈倪鑫,杨晟辉,王任鑫,等.应用于低频水声信号探测的小型潜标系统设计[J].电子器件,2019,42(2):497-500.

SHEN N X, YANG SH H, WANG R X, et al. The design of a small buoy system for detecting low-frequency underwater acoustic signals[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2019, 42(2): 497-500.

- [4] 孙大军,吕云飞,师俊杰,等.声学滑翔机技术现状及发展趋势[J].数字海洋与水下攻防,2023,6(2):133-144.

SUN D J, LYU Y F, SHI J J, et al. Discussion on present situation and future trend of acoustic glider technology [J]. Digital Ocean & Underwater Warfare, 2023, 6(2): 133-144.

- [5] 荆博原,张国军,柳燕,等.基于FPGA的MEMS水听器数据采集系统[J].电子器件,2023,46(2):443-448.

JING B Y, ZHANG G J, LIU Y, et al. Data acquisition system of MEMS vector hydrophone based

- on FPGA[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2023, 46(2): 443-448.
- [6] 沈倪鑫, 王任鑫, 张国军, 等. 基于FPGA的电容式声压传感器阵列信号采集存储系统[J]. 仪表技术与传感器, 2019(3):97-100.
SHEN N X, WANG R X, ZHANG G J, et al. Signals acquisition and storage system of capacitive hydrophone array based on FPGA [J]. Instrument Technique and Sensor, 2019(3): 97-100.
- [7] 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 Y, TAO L W. Multi-channel data acquisition system based on FPGA and STM32 [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2020, 38(2): 351-358.
- [8] 邢攸广, 王振, 刘振江, 等. 基于潜标的水声信号数据采集系统[J]. 测控技术, 2015, 34(2): 28-34.
XING Y G, WANG ZH, LIU ZH J, et al. Underwater acoustics data acquisition system based on submersible buoy [J]. Measurement & Control Technology, 2015, 34(2): 28-34.
- [9] FISHELL E, SCHNEIDER T, SCHMIDT H. Design, implementation, and characterization of precision timing for bistatic acoustic data acquisition[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2016, 41(3): 583-591.
- [10] SONG D L, GAO S, XU M. Hardware design of a submerged buoy system based on electromagnetic inductive coupling[C]. MATEC Web of Conferences, 2016, 75:01001.
- [11] 邵清, 赵振宇, 李广岩. 超低功耗水下值守系统设计与实现 [J]. 东北师大学报(自然科学版), 2018, 50(4): 90-94.
SHAO Q, ZHAO ZH Y, LI G Y. Design and implementation of an ultra-low power consumption underwater unattended system [J]. Journal of Northeast Normal University (Natural Science Edition), 2018, 50(4): 90-94.
- [12] ANICETO A S, PEDERSEN G, PRIMICERIO R, et al. Arctic marine data collection using oceanic gliders: Providing ecological context to cetacean vocalizations[J]. Frontiers in Marine Science, 2020, 7: 585754.
- [13] WANG C, YUAN M. Application study of a new underwater glider with single vector hydrophone for target direction finding [J]. IEEE Access, 2021, 9: 34156-34164.
- [14] YU M, HE Y T, KONG Q. Research on pattern extraction method of underwater acoustic signal based on linear array [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2022, DOI:10.1155/2022/1819423.
- [15] 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 D M, XU H D, HU CH Q, et al. A design of signal acquisition circuit for self-contained hydrophone[J]. Technical Acoustics, 2023, 42(3): 306-313.
- [16] 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 W, SUN Q D, MA SH Q, et al. Design and implementation of STM32H743 series underwater acoustic data acquisition and storage system [J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(16): 98-102.
- [17] 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 Y, MA SH Q, SUN W, et al. Design of signal acquisition and processing system based on single vector hydrophone [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2022, 41(2):71-77.
- [18] YUAN M, WANG C, DA L L, et al. Signal detection method using a single vector hydrophone in ocean acoustics[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2022, 152(2): 789-798.

作者简介

孙巍, 硕士, 工程师, 主要研究方向为嵌入式系统设计。

E-mail:swfx20112@163.com

袁猛, 博士, 副研究员, 主要研究方向为水声信号处理。

E-mail:yuanm2012@foxmail.com

王文龙, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为声学传感器研发与应用、水下无人探测技术等。

E-mail:wilon7521@qq.com

王超, 博士, 副研究员, 主要研究方向为水声信号处理。

E-mail:120107769@qq.com

孙芹东(通信作者), 硕士, 副研究员, 主要研究方向为声矢量传感器及其应用技术。

E-mail:sqd2010@163.com