

# 海洋多道地震拖缆数据采集包设计

周洋<sup>1,2</sup>, 熊晓东<sup>1</sup>, 裴彦良<sup>2,3</sup>, 阚光明<sup>2,3</sup>, 连艳红<sup>4</sup>, 吴爱平<sup>1</sup>

(1. 长江大学 电子信息学院, 湖北 荆州 434020; 2. 青岛海洋科学与技术国家实验室海洋地质过程与环境功能实验室, 山东 青岛 266061; 3. 自然资源部第一海洋研究所 海洋沉积与环境地质国家海洋局重点实验室, 山东 青岛 266061; 4. 西安虹陆洋机电设备有限公司, 陕西 西安 710000)

**摘要:** 针对海洋地震信号幅度小、动态范围大、噪声干扰强等特点, 设计了基于高精度 32 位  $\Delta-\Sigma$ (Sigma-Delta)模数转换器(ADC)的海洋多道地震拖缆四通道采集包。该地震信号采集包以 STM32L432 为核心, 使用 SPI 总线控制 4 片 32 位模数转换器完成地震信号采集, 采用九轴姿态传感器实时监测拖缆姿态, 通过 RS485 接口将地震数据和姿态数据上传到数传包。测试表明: 该装置自噪声小、动态范围大、功耗小、运行可靠, 对海洋地震勘探高精度信号采集研究具有借鉴意义。

**关键词:** 海洋多道地震勘探; 地震拖缆; 数据采集; 32 位  $\Delta-\Sigma$  模数转换器

中图分类号: TP247 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2018)12-0030-07

DOI: 10.11759/hyxx20171101002

海洋中的石油资源含量十分丰富, 据有关数据显示, 海洋石油资源占全球石油总资源的 35%<sup>[1]</sup>。天然气水合物作为一种新型能源, 具有清洁、环保和利用程度高的特点, 勘查结果表明, 我国东海和南海含有丰富的天然气水合物资源<sup>[2-3]</sup>。现如今, 我国的海洋工程建设越来越多, 而海洋工程勘察、海底地质灾害调查是海洋工程建设必不可少的前期工作之一<sup>[4-5]</sup>。海洋石油勘探、天然气水合物勘探和海洋工程勘察的常用手段均为海洋地震勘探。因此, 海洋地震勘探装备尤为重要。

近年来, 国内许多企业、研究机构在海洋地震拖缆勘探系统方面进行了大量的研究, 也有一些产品设备问世<sup>[6-9]</sup>。而我国海洋地震勘探设备整体技术仍落后, 基本依赖进口的局面没有改变。国外公司对其产品和技术进行了垄断, 小道间距、大作业水深、高精度的产品对我国禁运, 这严重限制了我国海洋地震勘探技术的发展。因此, 发展国产海洋地震勘探设备显得尤为重要, 其具有深远的技术意义和极大的经济和社会价值。

在相关项目的资助下, 笔者设计和研发了海洋多道地震拖缆数据采集包。采集包从数据采集性能和系统功耗着手, 使用高精度 32 位 ADC (模数转换器)转换器和基于 ARM Cortex M4 内核的低功耗微控制器, 实现了四通道地震信号高精度采集。

## 1 系统设计

### 1.1 多道地震拖缆结构简介

海洋地震拖缆勘探系统由多道地震拖缆、船上记录控制系统和震源组成, 如图 1 所示。多道地震拖缆拖曳在船尾, 用于接收地震信号, 将接收的地震信号在拖缆内部数字化后上传到船上记录控制系统。船上记录控制系统, 负责拖缆控制、数据接收、存储、显示等。震源用来产生地震波<sup>[10-11]</sup>。

多道地震拖缆在结构上可以分为四个主要功能段, 由前至后分别为甲板缆、前弹性段、工作段和后弹性段<sup>[12-13]</sup>。其中, 工作段是多道地震拖缆的主体, 主要由水听器、采集包和数传包等组成。工作段分

收稿日期: 2017-11-01; 修回日期: 2017-12-21

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0303901); 国家自然科学基金项目(41527809); 国家自然科学基金(国家基金委-山东省联合基金项目, U1606401); 青岛海洋科学与技术国家实验室鳌山科技创新计划项目(2015ASKJ01); 泰山学者工程专项经费资助(TSPD20161007)

[Foundation: National Key R&D Program of China, No.2016YFC0303901; National Natural Science Fund of China, No. 41527809; NSFC: Marine Geological Process and Environment, No.U1606401; Scientific and Technological Innovation Project Financially Supported by Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, No.2015ASKJ01; Research Fund for the Taishan Scholar Project of Shandong Province, No.TSPD20161007]

作者简介: 周洋(1991-), 男, 湖北孝感人, 硕士研究生, 主要从事油气信号检测方法与仪器研究, 电话: 15971260008, E-mail: 1159789170@qq.com; 裴彦良(1977-), 通信作者, 男, 河北永清人, 高级工程师, 硕士, 电话: 0532-88967483, E-mail: peiyanliang@fio.org.cn

为若干个子段, 子段结构如图 2 所示。每个子段长 50 m, 等间距分布着 4 个采集包和 16 道水听器道。一个采集包管理 4 道水听器, 道间距 3.125 m, 子段之间由数传包相连。子段中的水听器将地震信号转换为电信号, 经采集包数字化后, 上传给数传包。



图 1 海洋地震拖缆勘探系统

Fig. 1 Exploration system of the marine seismic streamer

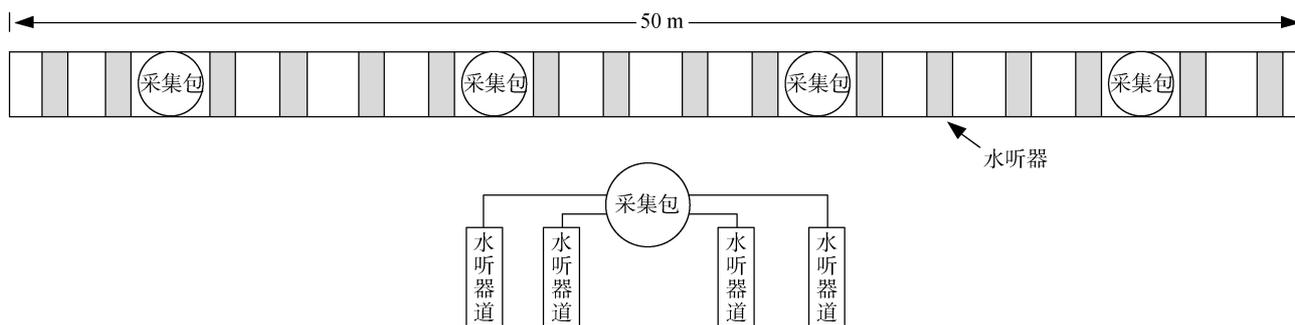


图 2 多道地震拖缆子段结构

Fig. 2 Sub structure of the multi-channel seismic streamer

## 1.2 四通道采集包总体设计

多道地震拖缆四通道采集包总体设计框图如图 3 所示。采集包主要由 MCU(微控制器)、RS485 通信电路、4 路模数转换通道、4 路信号调理电路、开关电路、9 轴姿态传感器和电压检测电路等模块组成。水听器将地震信号转换为电信号, 通过开关电路后, 传输到信号调理电路。信号调理电路对电信号进行滤波、放大处理。MCU 通过 SPI(串行外设接口)总线控制 4 路模数转换器, 完成地震信号数字化。采集包使用 4 片 32 位模数转换器, 实现 4 通道地震信号同步采集, 采样频率 1~16 kHz 可调。最后, MCU 使用 RS485 总线将数据上传到数传包。采集包采用基于

自定义的三层通信模型, 完成与数传包的通信。三层通信模型包含: 物理层、链路层和应用层。其中, 物理层为 RS485 总线, 链路层包含帧起始、地址和校验等信息, 应用层包含数据的类型和采集的数据。

采集包具备自检模式。采集包处于自检模式时, MCU 的 DAC(数模转换器)外设产生 150 Hz 的正弦波测试信号。采集包将正弦波测试信号数字化后, 将数据上传。利用自检模式可以验证系统的通信功能、数据采集功能和评估系统内噪声。

该采集包具备姿态监测功能。采集包内嵌 9 轴姿态传感器, 实时采集陀螺仪、加速度计和磁力计的数据, 采样频率为 100 Hz。

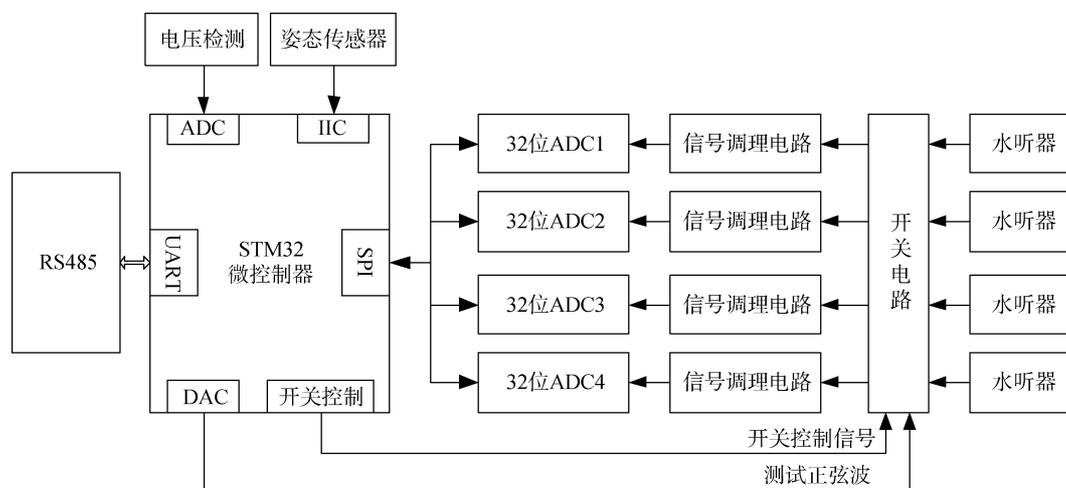


图 3 四通道采集包总体设计框图

Fig. 3 Overall block diagram of the four channels' acquisition package

## 1.3 系统硬件设计

### 1.3.1 主控单元

系统主控制器采用 STM32L432。STM32L432 单片机为 32 位 ARM Cortex-M4 内核的低功耗微控制器,其最高运行频率高达 80 MHz,采用 QFPN32 封装,包含众多外设。该 MCU 尺寸小,功耗低,可以满足多道地震数据采集系统对尺寸与功耗要求较高的应用。主控制器主要控制 ADC 完成地震信号采集,并将数据上传到采集包。主控电路主要包含 MCU 及其复位电路、时钟电路等。

### 1.3.2 模数转换接口

模数转换器使用 ADS1263,其为 32 位高精度  $\Delta$ - $\Sigma$  转换器,最高转换频率高达 38.4 kHz。ADS1263 是具有集成 PGA(可编程增益放大器)、电压基准和内部故障监视器的低噪声、低漂移  $\Delta$ - $\Sigma$  ADC。多道地震拖缆四通道采集包共使用 4 片 ADS1263,每一个 ADC 完成一道地震信号采集。集成 PGA 可调放大倍数有 1、2、4、8、16 和 32。使用内部集成 PGA 可以有效提高 ADC 的有效位数。经测试,采样率 1 kHz,PGA 放大倍数 32 时,可以测量的最小噪声为 0.2  $\mu$ V。

### 1.3.3 信号调理电路

针对地震信号幅度小、噪声干扰强的特点,设计了由仪表放大器和 RC 网络构成的信号调理电路。仪表放大器选用 AD8224,其为一款 JFET 输入型双通道高性能仪表放大器。地震信号经过仪表放大器放大,放大倍数为 2 倍。信号被放大后,使用 RC 滤波电路滤除干扰信号。

### 1.3.4 RS485 通信接口

RS485 通信接口使用 SN65HVD73。SN65HVD73 为全双工 RS485 总线驱动器,其最高速率高达 20 Mbps,功耗最高 250 mW。RS-485 接口采用平衡驱动器和差分接收器的组合,传输距离远,抗共模干扰能力强,抗噪声干扰性能好。RS485 通信接口为通信模型的物理层接口,提供数据和命令的物理通道。

### 1.3.5 姿态采集

姿态传感器使用 MPU9250。MPU9250 包含 3 轴加速度计、3 轴陀螺仪和 3 轴磁力计。该传感器自带数字运动处理器(DMP: Digital Motion Processor)硬件加速引擎,可以整合九轴传感器数据,输出完整的四元数<sup>[14]</sup>。姿态采集电路采用 IIC 通信方案,其中 MPU9250 的中断引脚接入到单片机的外部中断脚,MPU9250 通过中断的方式触发 MCU 实时读取姿态

数据。

## 1.4 系统软件设计

采集包软件包括主程序、地震数据采集任务、数据打包上传任务和命令解析任务等。

### 1.4.1 主程序

主程序首先完成 MCU 外设、姿态传感器和 32 位模数转换器的初始化。主程序完成初始化后,进入一个大循环。在大循环中,根据不同条件,完成系统状态数据采集、系统姿态数据采集、命令处理和数据发送等任务。程序流程图如图 4 所示。

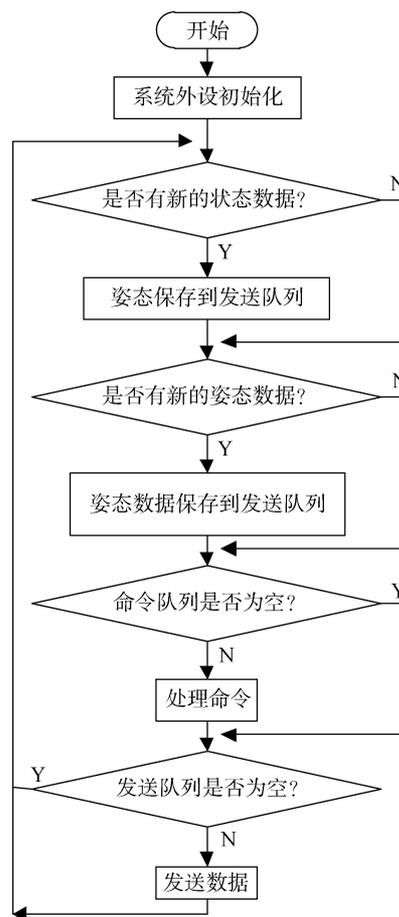


图 4 主程序流程图

Fig. 4 Flow chart of the main program

状态数据包含了系统当前的运行状态,表征系统当前工作是否正常。状态数据包括:系统状态、系统电压、系统温度和通信误码。其中系统状态包括 4 片 ADC、9 轴姿态传感器等外设的工作状态。

MCU 控制姿态传感器 MPU9250,完成姿态数据的采集。姿态数据包括 3 轴陀螺仪、3 轴加速度计、3 轴磁力计和 DMP 处理得到的四元数。微控制器获

取到姿态数据后，将姿态数据保存到发送队列，等待发送。

命令处理任务用来处理上位机发送来的控制命令。系统命令如下：开关控制、AD 同步复位、AD 采样率配置和触发采集，以及若干调试命令。主控制器接收到正确命令帧后，启动命令处理子程序。在命令处理子程序中，首先判断命令的类型，根据命令类型执行相应的功能函数。

### 1.4.2 地震数据采集任务

地震数据采集任务的设计为系统软件设计的重点，主要体现在地震信号同步采集。

系统采用 SPI 总线以时分复用方式控制 4 路模数转换器，完成数据采集。系统在初始化 4 片 ADC 芯片时，将 4 片 ADC 的参数设置相同。然后同时设置 ADC 的 START 引脚为高电平，实现 4 片 ADC 的同步采集。同时，使用时钟同步机制和同步控制命令实现多个采集包的同步采集。当采集到一次数据后，使用 SPI 总线，依次读取 4 片 ADC 采集到的地震数据，并计算校验和是否正确。若校验和正确，将数据保存到 RAM 中，等待数据打包上传任务将数据打包发送到数传包。

### 1.4.3 数据打包上传任务

数据打包上传任务，判断队列中是否有数据，如果有，则将数据打包，然后将数据上传到数传包。数据打包上传任务使用循环冗余校验技术，提高了系统的差错检测能力。同时，采集包采用环形队列缓冲区和 DMA(存储器直接访问)传输技术，实现数据上传。其流程如图 5 所示。

数据打包上传任务先判断环形缓冲队列是否有新数据，如果有数据，检测串口是否处在忙状态。如果串口空闲，则将数据按照规定的协议打包，其中，校验字节使用 CRC8 校验码。打包完成后，启动 UART 传输数据。

UART 传输使用 DMA 传输技术，DMA 控制器将打包的数据传输给 UART。从而，数据传输子程序占用极少数的 CPU 资源，提高了 MCU 的效率。

### 1.4.4 命令解析任务

命令解析任务的设计为系统软件设计的难点，系统使用有限状态机完成命令解析，状态转换图如图 6 所示。MCU 每接收到一个字节的的数据后，会触发 MCU 的串口中断。在中断服务程序中将接收到的数据存入缓冲区，并解析数据。系统上电后，状态机处于空闲状态。当接收到一个字节，并判断此字节为

帧起始后，状态机进入帧起始状态。若又接收到正确的地址后，状态机进入地址状态，若地址不正确，则返回到空闲状态。在地址状态时，串口接收到命令后，状态机进入命令状态。命令状态的下一个状态为字节数状态。若字节数为 0，状态机进入校验状态；若字节数不为 0，状态机进入数据状态。状态机处于数据状态时，接收完所有的数据后，状态机进入校验状态。在校验状态中，完成 CRC8 数据校验。若校验正确，保存命令和数据，然后状态机回到空闲状态；若校验不正确，标记错误，状态机回到空闲状态。

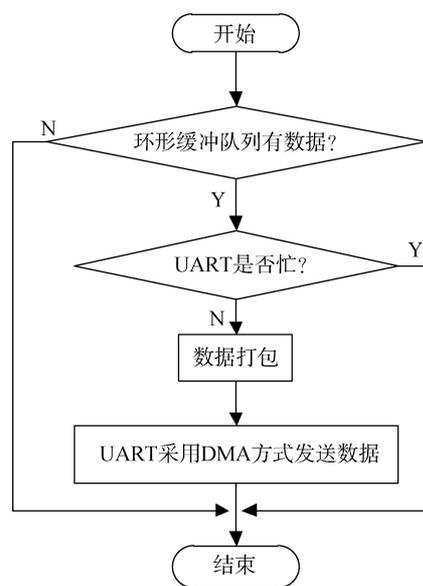


图 5 数据打包上传任务流程图  
Fig. 5 Flow chart of data packaging and uploading

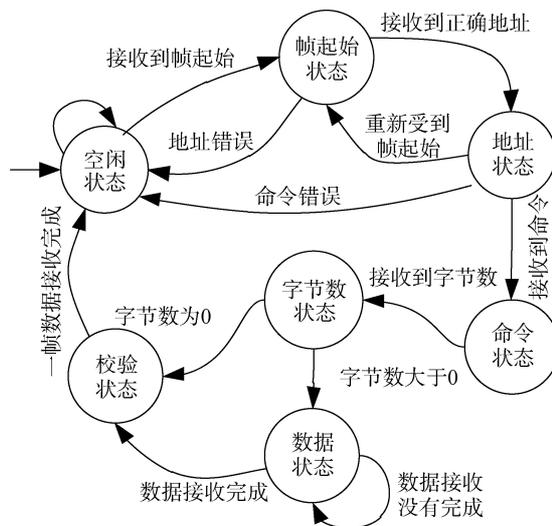


图 6 命令解析状态转换图  
Fig. 6 State transition diagram of command parsing

## 2 测试与分析

### 2.1 系统功耗

采集包的功耗直接影响了地震拖缆的整体性能,因此,采集包的功耗控制显得尤为重要。测试表明:采样率越大,采集包的功耗越大。当采样率为 1 kHz 时,采集包功耗仅为 462 mW;当采样率为 16 kHz 时,功耗为 628 mW。

### 2.2 系统噪声和动态范围

将采集包设置为噪声测试模式,即此时采集包的信号输入端短接至地,采集包采集 4 096 个采样点,然后计算均方根值,得到系统噪声。表 1 给出了不同采样率和增益下的系统噪声。系统在 1 kHz 采样,放大倍数为 64 倍时,系统噪声仅为 0.9  $\mu\text{V}$ 。

表 1 采集包系统噪声

Tab. 1 System noise of the acquisition packet

采样 频率/kHz	噪声/ $\mu\text{V}$					
	2 倍	4 倍	8 倍	16 倍	32 倍	64 倍
1	2.5	1.6	1.2	1.0	0.9	0.9
2	3.5	2.2	1.6	1.3	1.3	1.2
4	4.3	2.7	2.1	1.8	1.7	1.7
6	4.4	2.9	2.3	2.1	2.0	2.0
12	6.0	3.9	3.1	2.8	2.8	2.7
16	7.5	4.6	3.7	3.6	3.5	3.2

动态范围(Dynamic Range, DR): 表征系统可以达到的最大值和最小值之间的范围,采集包可以测量的信号的最大值为 $\pm 1.25\text{ V}$ , 则

$$\text{DR} = 20\lg \frac{U_{\text{Signal MAX}}}{U_{\text{Noise RMS}}} = 20\lg \frac{2.5\text{ V}}{0.9\ \mu\text{V}} = 129\text{dB},$$

其中, DR 为动态范围,  $U_{\text{Signal MAX}}$  为系统可以测量的最大值,  $U_{\text{Noise RMS}}$  为系统的最小噪声。由此,可计算出采集包的动态范围可达 129 dB。

### 2.3 自检功能测试

采集控制软件将采集包设置为自检模式。此时,采集包产生标准正弦波信号模拟地震输入信号,采集包将标准正弦波信号数字化后,将数据上传到数传包,完成系统自检,得到如图 7 所示的四通道测试波形。由图 7 可知,采集包获取的波形为正弦波,其 VPP 为 2.28 V。测试结果说明采集包的数据采集和数据传输功能正常。

### 2.4 该系统与同类系统对比

表 2 为本文系统与同类系统的性能对比。由表可知,本文系统的 ADC 类型和动态范围优于其它同类系统;功耗水平也较低。从对比结果可知,该采集包性能达到了同类系统的性能,能够满足海洋地震勘探的要求。

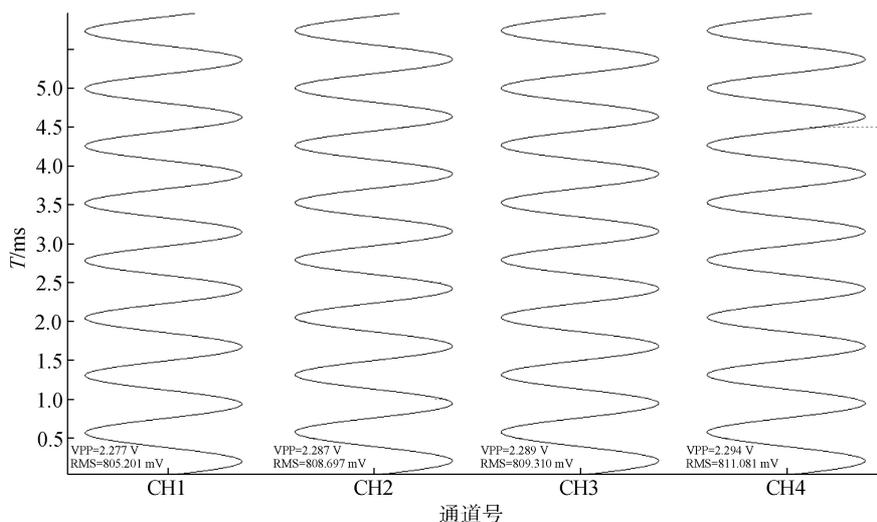


图 7 自检功能测试波形图

Fig. 7 Test results of the self-checking function

## 3 结论

本文描述的海洋多道地震拖缆四通道采集包,采

用基于 ARM Cotex M4 内核的低功耗微控制器,降低了系统功耗。采集包的模数转换器,使用 32 位精密  $\Delta\text{-}\Sigma$  ADC,提高了信号采集精度和动态范围。系统通信协

议使用循环冗余校验技术, 改善了系统差错检测能力。测试表明, 该采集包自噪声小、动态范围大、功耗小,

能有效实现 4 通道地震信号同步采集, 对海洋地震勘探宽范围高精度信号采集研究具有一定的参考意义。

表 2 相关参数对比

Tab. 2 Comparison of relevant parameters

系统	采集通道	ADC 类型	动态范围/dB	功耗/W
DigiSTREAMER	16	$\Delta$ - $\Sigma$ 24bit	116	3.5
GeoEel	8	$\Delta$ - $\Sigma$ 24bit	120	4.8
SeaMUX	24	$\Delta$ - $\Sigma$ 24bit	112	8
本文系统	4	$\Delta$ - $\Sigma$ 32bit	129	0.628

参考文献:

- [1] 从军. 海洋石油地震勘探技术的研究[J]. 中国新技术新产品, 2015, 23(21): 162.  
Cong Jun. Research on marine petroleum seismic exploration technology[J]. New Technology & New Products of China, 2015, 23(21): 162.
- [2] 黄国成. 海底天然气水合物资源勘探流程和评价方法[D]. 北京: 中国地质大学, 2008.  
Huang Guocheng .The process of resource exploration and estimate for submarine gas hydrate[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2008.
- [3] 褚宏宪, 孙运宝, 秦轲, 等. 小道距高分辨率多道地震对天然气水合物勘查的适用性[J]. 海洋地质前沿, 2015, 31(6): 50-54.  
Chu Hongxian, Sun Yunbao, Qin Ke, et al. Application of small-scale array high-resolution multi-channel seismic to gas hydrates exploration[J]. Marine Geology Frontiers, 2015, 31(6): 50-54.
- [4] 何叶, 钟广法. 海底滑坡及其反射地震识别综述[J]. 海洋科学, 2015, 39(1): 116-125.  
He Ye, Zhong Guangfa. Current status of submarine landslide and their seismic recognition[J]. Marine Sciences, 2015, 39(1): 116-125.
- [5] 王海平, 张伟, 李春雷, 等. 海底浅层地质灾害的高分辨率地震识别技术[J]. 海洋科学, 2014, 38(7): 103-109.  
Wang Haiping, Zhang Wei, Li Chunlei, et al. High resolution seismic identification of seafloor shallow geological hazards[J]. Marine Sciences, 2014, 38(7): 103-109.
- [6] 吴增海, 宋克柱, 曹平. 用于海洋地震勘探的数字包设计与实现[J]. 数据采集与处理, 2013, 28(2): 250-256.  
Wu Zenghai, Song Kezhu, Cao Ping. Design and Realization of Digitizer for Marine Seismic Exploration[J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2013, 28(2): 250-256.
- [7] 陈劲. 水听器线列阵的数据采集与传输关键技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2013.  
Chen Jin. Research on Key Technologies of data acquisition and transmission in hydrophone linear array[D]. Tianjin: Tianjin University, 2013.
- [8] 邢磊. 海洋小多道地震高精度探测关键技术研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.  
Xing Lei. Study of the key technologies of high-precision marine multichannel seismic survey[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012.
- [9] 王揆洋, 黄逸凡, 连艳红, 等. 海洋浅地层高分辨率多道地震探测技术及应用[M]. 北京: 海洋出版社, 2011.  
Wang Kuiyang, Huang Yifan, Lian Yanhong, et al. Marine Shallow Ground High-Resolution Multi-Channel Seismic Detection Technology and Application[M]. Beijing: China Ocean Press, 2011.
- [10] Parkinson R. High Resolution Site Surveys[M]. New York: Spon Press, 2001: 11.
- [11] Jones E J W. Marine Geophysics[M]. England: John Wiley & Sons Ltd, 1999.
- [12] 裴彦良, 赵月霞, 刘保华, 等. 近海高分辨率多道地震拖缆系统及其在海洋工程中的应用[J]. 地球物理学进展, 2010, 25(1): 331-336.  
Pei Yanliang, Zhao Yuexia, Liu Baohua, et al. The off-shore high-resolution multi-channel seismic streamer and its application to the ocean engineering[J]. Progress in Geophysics, 2010, 25(1): 331-336.
- [13] 裴彦良, 刘保华, 连艳红, 等. 海洋高分辨率多道数字地震拖缆技术研究与应用[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(6): 3280-3286.  
Pei Yanliang, Liu Baohua, Lian Yanhong, et al. Marine high resolution multi-channel digital seismic streamer and its application in the ocean engineering[J]. Progress in Geophysics, 2013, 28(6): 3280-3286.
- [14] 刘春阳, 徐军领, 程洪涛, 等. MPU9250 传感器的姿态检测与数据融合[J]. 河南科技大学学报: 自然科学版, 2015, 36(4): 14-17.  
Liu Chunyang, Xu Junling, Cheng Hongtao, et al. Attitude detection and data fusion based on sensor of MPU9250[J]. Journal of Henan University of Science & Technology, 2015, 36(4): 14-17.

## Design of a data acquisition package for a marine multi-channel seismic streamer

ZHOU Yang<sup>1, 2</sup>, XIONG Xiao-dong<sup>1</sup>, PEI Yan-liang<sup>2, 3</sup>, KAN Guang-ming<sup>2, 3</sup>, LIAN Yan-hong<sup>4</sup>, WU Ai-ping<sup>1</sup>

(1. Electronic Information School, Yangtze University, Jingzhou 434020, China; 2. Laboratory for Marine Geology, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266061, China; 3. Key Laboratory of Marine Sedimentology and Environmental Geology, First Institute of Oceanography, MNR, Qingdao 266061, China; 4. Xi'an Hongluyang Electromechanical Equipment Co. LTD, Xi'an 710000, China)

**Received:** Nov. 1, 2017

**Key words:** marine multi-channel seismic exploration; seismic streamer; data acquisition; 32-bit  $\Delta$ - $\Sigma$  ADC

**Abstract:** In view of the small amplitude, large dynamic range, and strong noise interference of marine seismic signals, a four-channel acquisition package of multi-channel seismic streamer based on a high-precision 32-bit  $\Delta$ - $\Sigma$  analog-to-digital converter was designed. The seismic signal acquisition package, with STM32L432 as the core, uses the SPI bus to control four 32-bit analog-to-digital converters for seismic signal acquisition. In addition, a 9-axis attitude sensor was used to monitor the streamer posture in real time, and the seismic data and attitude data were uploaded to digital packets via an RS485 bus. Tests showed that the device has the merits of small noise, large dynamic range, low power consumption, and reliable operation. It has great significance for the study of high-precision signal acquisition in marine seismic exploration.

(本文编辑: 刘珊珊)