

海洋多道地震拖缆数据实时传输系统的设计与实现

吴爱平^{1,4}, 祁红学^{1,4}, 熊晓东¹, 裴彦良^{2,3,4}, 阚光明^{2,3,4}, 连艳红⁵

(1. 长江大学 电子信息学院, 湖北 荆州 434023; 2. 自然资源部第一海洋研究所, 山东 青岛 266061; 3. 海洋沉积与环境地质自然资源部重点实验室, 山东 青岛 266061; 4. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋地质过程与环境功能实验室, 山东 青岛 266061; 5. 西安虹陆洋机电设备有限公司, 陕西 西安 710000)

摘要: 为满足深拖式高分辨多道地震勘探需求, 设计并实现了海洋地震拖缆数据的实时传输系统。系统由数传包与地震采集站连接组成, 采用推荐标准 485(Recommended Standards 485, RS485)串行总线实现了采集站与数传包的物理连接, 利用低电压差分信号(Low-Voltage Differential Signaling, LVDS)、预加重/均衡器、8 位/10 位(8bit/10bit)编码等技术实现了数传包之间的通信链路。设计了无等待反馈重传的差错控制方法, 提高系统高效性和可靠性; 在现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)内部采用先进先出(First Input First Output, FIFO)构建多优先级任务队列的多级流水线设计, 解决了大容量数据并发而产生的数据漏帧问题。在实验室用已知正弦信号对系统进行了对比测试, 结果表明系统能够满足海洋多道地震勘探的数据传输需求, 对于海洋多道高分辨率地震资料的可靠获取具有重要的意义。

关键词: 深拖式; 海洋地震勘探; 实时传输; 差错控制; 任务队列

中图分类号: P715 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3096(2019)03-0000-07

DOI: 10.11759/hyxx20171031001

我国天然气水合物已从资源勘查阶段进入试开采阶段^[1], 国内现有的浅层海洋地震探测设备作业深度浅, 分辨率低, 不能满足开展天然气水合物高分辨率的勘探需求; 而国外在深水高分辨率地震探测技术方面研究较早, 并已经形成了成熟的小道距多通道深水地震探测装备, 但是, 此类产品对我国限售^[2]。在此背景下, 自然资源部第一海洋研究所等组成的研究团队开展了“深拖式高分辨率多道地震探测技术与装备”研究^[3]。深拖式高分辨率多道地震探测具有作业深度深、采集数据量大等特点, 地震数据实时可靠传输是海洋地震勘探数据获取的重要环节, 对地震信息可靠、高效的获取具有决定性作用。本文在国内现有地震拖缆数据传输技术的基础上, 针对多通道、多类型、大容量数据并发而导致的漏帧问题, 采用先进先出(First Input First Output, FIFO)构建了多优先级任务队列的流水线设计, 实现了大容量地震数据实时上传, 同时研究了无等待反馈重传的差错控制设计, 提高了地震数据上传的可靠性和高效性。

1 系统设计

1.1 多道地震拖缆结构简介

海洋多道地震探测设备由船上控制中心、震源

和 underwater 拖缆组成。船上控制中心负责对水下拖缆控制、数据接收、存储和显示等, 震源用来产生地震波, 水下拖缆拖曳在船尾, 用于接收海洋地层反射的地震信号, 将接收的地震信号在拖缆内数字化后上传到船上控制中心, 在控制中心存储、显示、分析处理^[4-7], 多道地震拖缆结构示意图如图 1 所示。

水下拖缆干端连接在船上控制中心, 湿端由数传包与工作段相互交替串接组成。每一个工作段长 50 m, 其中前半级工作段长 25 m, 后半级工作段长 25 m。每一个工作段内有 4 个采集站, 每一个采集站

收稿日期: 2017-10-31; 修回日期: 2018-01-22

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0303901); 国家自然科学基金(U1606401); 青岛海洋科学与技术试点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 Foundation of China, No.U1606401; The Scientific and Technological Innovation Project Financially Supported by Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), No.2015ASKJ01; The Research Fund for the Taishan Scholar Project of Shandong Province, No.TSPD20161007]

作者简介: 吴爱平(1977-), 男, 江苏泰州人, 副教授, 博士, 主要从事地球物理方法与仪器研究, 电话: 0716-8060632, E-mail: wuaping@yangtzeu.edu.cn; 裴彦良(1977-), 通信作者, 男, 河北廊坊人, 高级工程师, 博士, 电话: 0532-88967483, E-mail: peiyanliang@fio.org.cn

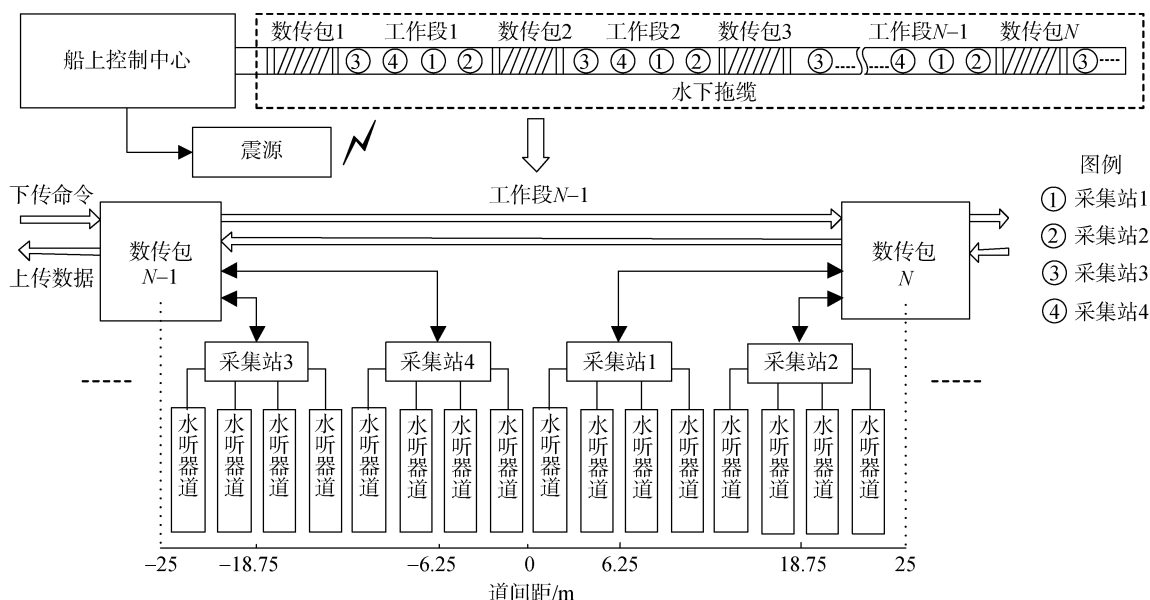


图1 多道地震拖缆结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of the multichannel seismic towing cable

分别与4个水听器道相连,每一个水听器道等间距分布,其道间距为3.125 m,前半级工作段和后半级工作段内各有8道水听器。数传包实现下传命令和上传数据的功能,每一个数传包分别连接对应工作段内的各个采集站,如数传包2与工作段1中的采集站1、采集站2和工作段2中的采集站3和采集站4相连接。下传命令是指数传包接收船上控制中心的控制命令,并转发到每一个采集站;上传数据是指接收采集站的地震数据和后级数传包上传的地震数据,再将地震数据上传到前级数传包,最后由前级的数传包逐级上传到船上控制中心。水下单条拖缆具有240道(采样率8 kHz)的带道能力,采样率最大支持16 kHz,模数转换器(Analog to Digital Converter, ADC)精度为32 bit,综合分析传输的数据量,水下拖缆的数据传输带宽需求不小于120 Mbps。

1.2 数传包与采集站连接设计

为减小数传包到采集站的传输距离,提高数据传输可靠性,采集站对称分布在数传包的两端,二者的最大通信距离为 $6 \times 3.125 \text{ m} = 18.75 \text{ m}$,如图1所示。数传包与采集站的数据传输包括命令下传和数据上传,命令下传的数据量小,实时性要求高;每个采集站采集4通道的地震数据,最大采样率为16 kHz,加上采集站姿态等数据传输和协议开销,采集站上传数据到数传包的带宽应不小于2.8 Mbps。

结合推荐标准485(Recommended Standards 485,

RS485)总线在数据传输距离为百米范围内的高速传输能力^[8],基于上述需求分析,拖缆内数传包与各采集站之间采用6类双绞线相连接,以通用异步收发传输器(Universal Asynchronous Receiver/Transmitter, UART)为硬件接口^[9]。命令和数据传输采用全双工通信方式,波特率为4.096 Mbps,传输协议采用RS485总线。船上控制中心向拖缆下发的控制指令数据量小,而水下拖缆向船上控制中心上传的数据量大,因此,下行指令和上传数据采用不同的形式进行交互,指令下行时采用广播的形式向各采集站发送控制命令,而各采集站和数传包进行数据上传时采用点对点的连接形式,数传包单侧与采集站的具体拓扑连接形式如图2所示。

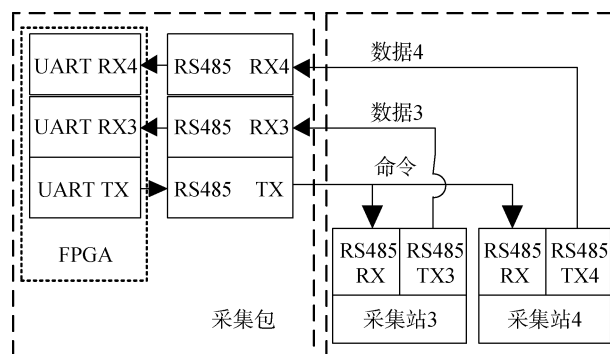


图2 数传包单侧与采集站的拓扑连接

Fig. 2 Topological connection between data transmission packet side and acquisition station

1.3 数传包级联设计

拖缆通信干路采用数传包级联的方式逐级上传地震数据,每一级的通信距离为工作段长,即 50 m。水下拖缆中数字包级联设计框图如图 3 所示,设计中采用全双工通信,利用低电压差分信号(Low-Voltage Differential Signaling, LVDS)接口标准^[10]、预加重和均衡技术、8 位/10 位(8 bit/10 bit)信源编码方式^[11-13],不仅满足大容量数据稳定传输的带宽需求,同时可以在下行通道中利用字节同步的形式提取同步时钟,

用于多道地震拖缆中地震信号进行同步采集的工作时钟参考。LVDS 串行器将 FPGA 输出的 10 位并行数据串行输出,经过预加重后产生一组差分发送信号(同相信号 TX+和反相信号 TX-),差分发送信号通过工作段中的双绞线传送至均衡器的输入端,接收的差分信号(同相信号 RX+和反相信号 RX-)经过均衡后传送至 LVDS 解串器, LVDS 解串器解析出的 10 位的并行数据送至 FPGA,实现数传包之间的数据传输,其中 LVDS 数据传输速率设计为 147.5Mbps。

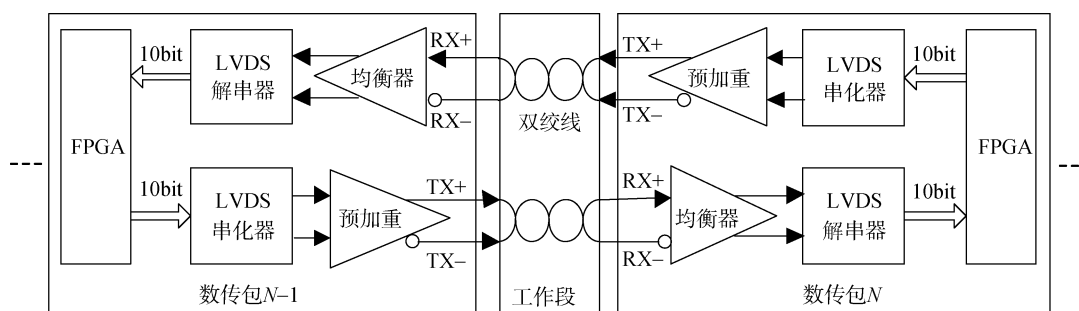


图 3 数传包级联框图

Fig. 3 Block diagram of the data transmission packets cascade

1.4 无等待反馈重传设计

数据传输过程中采用全双工通信,发送端每次发送一帧数据,在发送端进行数据缓存,同时在接收端产生一个帧响应(ACK),因为发送端发送数据的长度 L_1 远大于接收端 ACK 的长度 L_2 ,所以上一帧(N-1)数据产生的 ACK 在当前数据帧(N)发送完成前已传到发送端,可在等待 ACK 到达的时间进行数据传输。发送端在当前数据帧(N)发送完成前对第 N-1 帧数据的 ACK 信号进行分析,若解析判断数据传输正确,则读取第 N+1 帧数据并进行发送,若解析判断数据传输出现错误,则从缓存中读取当前帧(N)数据并重新进行发送。无等待反馈重传的差错控制^[14-15]示意图如图 4 所示,基于无等待反馈重传的控制方式,

充分利用了等待 ACK 响应的的时间,提高了单位时间内数据传输的效率。

1.5 环形队列设计

数传包上传的数据,由接收采集站上传数据和中继后级数传包上传数据组成,中继数据需在本级数传包内缓存,并按照设定的优先级分时上传本级数据和中继数据。

现有拖缆内部是采用乒乓缓存的方式实现中继上传^[16-17],这种方式存在一个弊端,当采样率提高,采样道数增加,上传数据类型(地震、拖缆姿态、差错重传等)增多时,大容量数据并发到达本级数传包,数据到达的瞬时速率大于服务上传的速率,就会产生数据上传拥塞问题,容易导致乒乓缓存数据溢出,出现地震数据帧丢失现象。本设计在现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)内部采用环形队列设计^[18],开辟足够的随机存取存储器(Random Access Memory, RAM)空间,缓存中继数据和本级数据,如图 5 所示。通过 FIFO 存放读环形队列的指针,开辟缓存空间,解决数据上传瞬时速率的匹配问题,从而消除因数据拥塞出现的溢出问题。

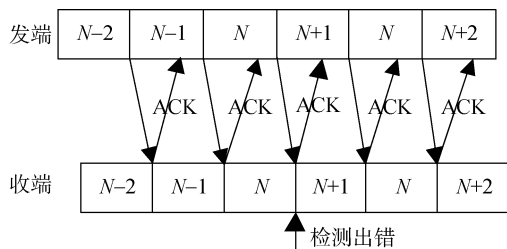


图 4 无等待反馈重传示意图

Fig. 4 Schematic of wait-free feedback retransmission

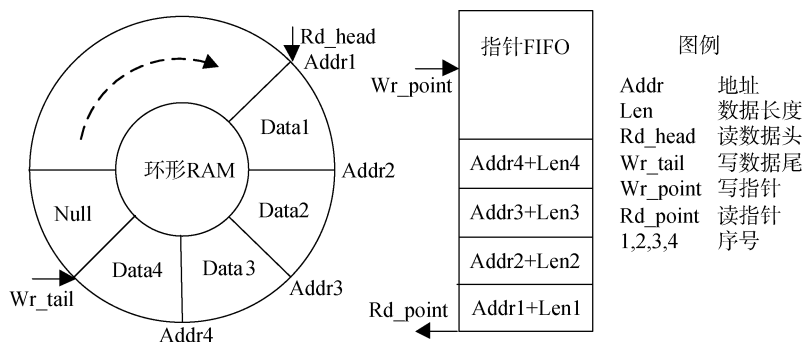


图 5 环形队列的示意图
Fig. 5 Schematic of ring queue

2 数据实时传输实现

2.1 多通道采集站数据汇集

数传包接收 4 个采集站的数据，单个采集站上传数据的突发速率为 409.6 kB/s，远小于数传包的处理速率 61.44 MB/s(FPGA 主频)，数据到达时间随机，且 4 个采集站的数据地位均等，所以数传包按自然优先级，先到先服务原则处理各通道的缓存数据。

多通道采集站数据汇集框图如图 6 所示，在 FPGA 内部主要有解析器、FIFO 控制、数据缓冲器 Cache 和 RAM 分配等模块。RX1-RX4 用于接收采集站 1—4 的数据，FPGA 内部的解析器 1—4 对接收到采集站 1—4 的数据同时进行解析，并将正确的解析数据分别写入到高速数据缓存器 Cache1—Cache4，同时启动写 FIFO 控制器。FIFO 控制器按照自然优先级响应，将 4 个缓存器的首地址和长度等结构体指针 Struct 参数依次写到 FIFO 队列。在 FIFO 队列非空和 RAM 分配器处于空闲状态时，对数据缓存器 Cache1—Cache 4 进行读操作，将读取的数据依次写到分配 RAM 所映射的地址空间，打包本地数据上传。

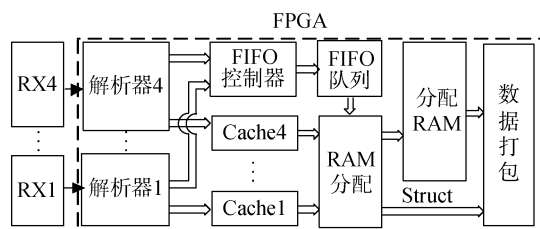


图 6 多通道数据汇集框图
Fig. 6 Block diagram of multichannel data collection

2.2 大容量数据实时上传

本级数传包上传的数据由 3 部分组成：采集站本级数据、后级数传包的中继数据、出现差错需要

重传的数据，3 类数据达到时间随机，瞬时到达速率均为 12.288 MB/s，单位时间的总平均到达速率 < 12.288 MB/s，数据量排序为中继数据 ≥ 本级数据 ≥ 重传数据。为保证数据实时上传，重传数据的优先级最高；由于中继数据量大于本级数据量，设置中继数据优先级高于本级数据优先级。

针对大容量数据并发上传出现的数据帧溢出问题，采用多个 FIFO 存储器，构建不同优先级的任务队列，设计框图如图 7 所示。数据打包模块写数据到本级 RAM 后，将写本级 RAM 的首地址、长度组合写入 FIFO 队列 2；LVDS 接收的中继数据校验正确后写入中继 RAM，将写中继 RAM 的首地址、长度组合写入 FIFO 队列 1；在 ACK 响应模块接收到错误帧响应时，利用返回帧号读取指针 RAM 的值，将重传数据首地址与长度写入到 FIFO 队列 0；发送控制器在空闲状态且 FIFO 队列 0—2 非空时，按照预先设置的优先级顺序读取一次 FIFO 队列，选择读取中继 RAM、本级 RAM、差错 RAM 的数据并附加传输帧号写入到 LVDS 发送模块；同时将 LVDS 发送的数据写入到差错 RAM 缓存，并将写入到差错 RAM 的首地址、长度写入到指针 RAM。

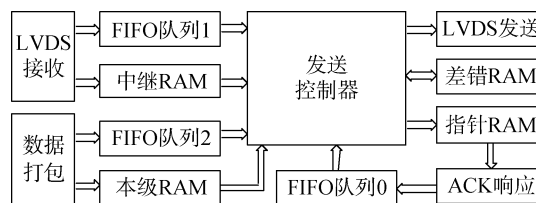


图 7 多优先级任务队列设计框图
Fig. 7 Design block diagram of multi-priority task queue

3 系统测试

结合当前海洋多道地震拖缆数据传输需求、特

点和存在的问题,在实验室环境下,按照《石油海上数字地震采集拖缆系统(GB/T 24261.2-2010)》^[19]标准,对系统的数据通信功能和通信质量性能进行测试分析。

3.1 通信功能正确性测试

利用采集站输出的标准信号作为系统的输入测试信号,开展多道、多类型、大容量数据并发上传功能测试,输入测试信号为正弦信号,其频率为 50 Hz、幅度为 2.1V,各通道采集的地震数据和姿态数据同时上传到控制中心。测试由 240 个采集通道组成,采样率设置为 8 kHz。

图 8 为系统采用乒乓缓存和环形队列方式实现数据上传功能测试的效果图,图中显示的是对第 13—32 通道采集上传的数据波形,左侧是采用乒乓缓存方式,右侧是采用环形队列方式,从图中可以清楚地发现,左侧图中的 20 列正弦波波形不平滑,出现了重影,而右侧图中的 20 列正弦波波形平滑,说明采用乒乓缓存方式接收的数据多次出现漏帧的问题,而采用环形队列方式接收的数据完全正确,可以完好地显示正弦波波形。测试结果表明系统可以在大容量数据并发上传时,采用环形队列对数据传输的瞬时速率进行平滑,匹配系统的数据传输速率,消除数据漏帧、误帧现象,实现地震数据实时准确上传。

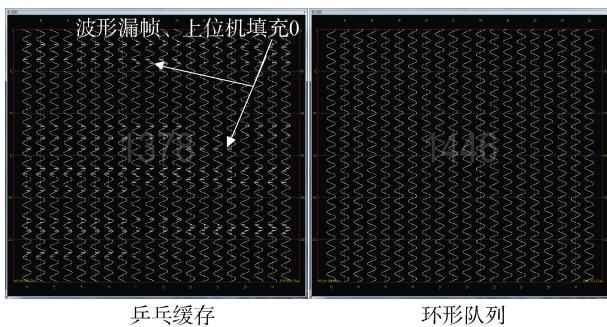


图 8 系统改用环形队列前后抽样波形对比图

Fig. 8 Comparison of the sampled waveforms before and after using ring queue

3.2 通信质量性能测试

通过指令设置,使系统工作于不同的模式,改变采样频率和通道数,测试系统的信道容量和带宽利用率等性能指标。测试结果如表 1,其中系统总带宽为 12.288 MB/S,协议额外开销为 0.2,通信容量为采样率×采样通道数×(1+协议开销)×4×12 bps。

表 1 系统的数据传输容量和带宽利用率

Tab. 1 Data transmission capacity and bandwidth utilization of the system

采样频率/ kHz	通道数/ 道	通信容量/ Mbps	带宽利用率/ %
4	240	55.296	37.5
8	240	110.592	75
12	200	138.24	93.75
16	152	140.08	95

通过表 1 分析可知,在采样频率为 4 kHz 和 8 kHz 时,系统最大的带道能力可达到 240 道,满足项目计划需求;在采样频率为 12 kHz 和 16 kHz 时,系统带宽利用率分别达到 93.75%和 95%。测试结果表明:采用 FIFO 实现环形队列的数据缓存技术,可有效提高带宽利用率。

4 结论

本文针对深拖式地震探测特点和现有拖缆在实现多通道、多类型、大容量数据并发上传而导致数据漏帧的问题,设计了无等待反馈重传的差错控制方法,有效地提高了地震数据上传的可靠性和高效性;采用 FIFO 构建了多任务环形队列的流水线设计,实现了地震数据实时上传。实验测试结果表明,系统可以满足深拖式多道地震探测的数据传输需求,对于深海高分辨率地震资料获取具有重要的意义。

参考文献:

- [1] 杨胜雄,梁金强,刘昌岭,等. 海域天然气水合物资源勘查工程进展[J]. 中国地质调查, 2017, 4(2): 1-8. Yang Shengxiong, LiangJinqiang, Liu Changling, et al. Progresses of gas hydrate resources exploration in sea area[J]. Geological Survey of China, 2017, 4(2): 1-8.
- [2] 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 Geophys, 2013, 28(6): 3280-3286.
- [3] 梁瑞才,王述功,刘保华. Pasisar: 一种深拖式高分辨率地震采集系统[J]. 海洋科学, 2000, 24(10): 53-55. Liang Ruicai, Wang Shugong, Liu Baohua. Pasisa: A high Resolution deep-towed seismic system[J]. Marine Sciences, 2000, 24(10): 53-55.
- [4] Roger P. High Resolution Site Surveys[M]. New York: Spon Press, 2001: 11.

- [5] Jones E J W. Marine Geophysics[M]. London: John Wiley & Sons Press, 1999.
- [6] 连艳红, 雷斌, 豆会平, 等. 高分辨率数字拖缆系统的设计与实现[J]. 物探装备, 2009, 19(S1): 21-24.
Lian Yanhong, Lei Bin, Dou Huiping, et al. Design and development of high-resolution digital streamer system[J]. Equipment for Geophysical Prospecting, 2009, 19(S1): 21-24.
- [7] 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.
- [8] 耿立中, 王鹏, 马骋, 等. RS485 高速数据传输协议的设计与实现[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2008, 48(8): 1311-1314.
Geng Lizhong, Wang Peng, Ma Cheng, et al. Design and implement of RS485 high speed data communications protocol[J]. Journal of Tsinghua University, 2008, 48(8): 1311-1314.
- [9] 王柯, 姜一扬, 张黄鹏, 等. 基于 FPGA 的 NAND 闪存控制器的设计与验证[J]. 计算机应用, 2018, 38(S2): 254-257.
Wang Ke, Jiang Yiyang, Zhang Huangpeng, et al. Design and verification of a NAND flash controller based on FPGA[J]. Journal of Computer Applications, 2018, 38(S2): 254-257.
- [10] 罗文清. MMC-HVDC 物理动态模拟仿真系统设计[D]. 吉林: 东北电力大学, 2017.
Luo Wenqing. The design of MMC-HVDC physical dynamic simulation system[D]. Jilin: Northeast Electric Power University, 2017.
- [11] 何智刚. 高分辨率海洋地震拖缆系统同步和传输技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
He Zhigang. Research of synchronization and transmission techniques for high resolution marine seismic streamer system[D]. Tianjing: Tianjing University, 2012.
- [12] 吴康, 段发阶, 陈劲, 等. 海上地震探测传输系统的设计[J]. 电子技术应用, 2010, 36(9): 101-103, 107.
Wu Kang, Duan Fajie, Chen Jin, et al. Design of transmission system for marine seismic detection[J]. Journal of Tsinghua University, 2010, 36(9): 101-103, 107.
- [13] 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: 32-89.
Wang Kuiyang, Huang Yifan, Lian Yanhong, et al. Marine High Resolution Muti-Channel Shallow Seismic Exploration Technology and its Application[M]. Beijing: China Ocean Press, 2011: 32-89.
- [14] 汪海山. 大型地震数据采集记录系统中数据传输的关键技术研究[D]. 北京: 清华大学, 2010.
Wang Haishan. Key Problem research on data transmission of large-scale seismic acquisition and recording system[D]. Beijing: Tsinghua University, 2010.
- [15] 马毅超. 大规模陆上地震仪器中高速可靠数据传输方法的研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2011.
Ma Yichao. Study on high-speed reliable data transmission for oil seismic exploration[D]. Heifei: University of science and technology of China, 2011.
- [16] 吴增海, 宋克柱, 杨俊峰, 等. 陆上地震勘探数据同步采集与实时传输的设计与实现[J]. 核电子学与探测技术, 2012, 32(11): 1233-1237, =1272.
Wu Zenghai, Song Kezhu, Yang Junfeng, et al. Design and realization of synchronous sampling and real-time transmission in land seismic data acquisition system[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2012, 32(11): 1233-1237, 1272.
- [17] 祁红学. 深海高分辨率多道地震数字拖缆中数据传输系统的研究[D]. 荆州: 长江大学, 2018.
Qi Hongxue. Research on data transmission system in deep-sea high resolution multichannel seismic digital streamer[D]. Jingzhou: Yangtze University, 2018.
- [18] 程宏才, 宋克柱, 杨俊峰, 等. 大型地震数据采集系统中的实时监视系统设计[J]. 核电子学与探测技术, 2012, 32(7): 814-819.
Cheng Hongcai, Song Kezhu, Yang Junfeng, et al. Real-time monitor system design in large scale data acquisition system[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2012, 32(7): 814-819.
- [19] GB/T24261.2-2010, 石油海上数字地震采集拖缆系统第 2 部分: 水听器拖缆技术条件[S].
GB/T24261.2-2010, Marine Seismic Digital Streamer System-Part2: Standards for Specifying Hydrophone Streamer-Cable Characteristic[S].

The design and implementation of real-time transmission system for marine multichannel seismic streamer data

WU Ai-ping^{1, 3}, QI Hong-xue^{1, 3}, XIONG Xiao-dong¹, PEI Yan-liang^{2, 3},
KAN Guang-ming^{2, 3}, LIAN Yan-hong⁴

(1. Electronics & Information School of Yangtze University, Jingzhou 434023, China; 2. First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China; 3. Key Laboratory of Marine Sedimentology and Environmental Geology, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China); 4. Laboratory for Marine Geology and Environment, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266061, China; 5. Xi'an Hongluyang Electromechanical Equipment Co. Ltd., Xi'an 710000, China)

Received: Oct. 31, 2017

Key words: deep-towed; marine seismic exploration; real-time transmission; error control; task queue

Abstract: To meet the requirements of deep-towed “high-resolution” multichannel seismic exploration, a real-time transmission system of marine seismic streamer data comprising data transmission packets and seismic acquisition stations, is designed and implemented. In the design, the physical connection between seismic acquisition station and data transmission packet is realized using RS485, and the communication link among data transmission packets is achieved using low-voltage differential signaling, pre-emphasis/equalizer, 8 bit/10 bit encoding, and other technologies. An error-control method of wait-free feedback retransmission is designed to improve the system efficiency and reliability. In addition, the multistage pipeline design of multi-priority task queue based on first-in, first-out is built in a field programmable gate array, which solves the problem of data frame leakage caused by large-volume data concurrency. After testing the system with a known sinusoidal signal in the laboratory, the results show that the system meets the requirements of multichannel seismic data transmission and has great significance for the reliable acquisition of multichannel high-resolution seismic data.

(本文编辑: 刘珊珊)