

文章编号:1004-9037(2013)02-0250-07

用于海洋地震勘探的数字包设计与实现

吴增海 宋克柱 曹 平

(1. 中国科学院核探测与核电子学国家重点实验室,合肥,230026;
2. 中国科学技术大学近代物理系,合肥,230026)

摘要:提出了一种高精度、高性能的用于海洋地震勘探的拖缆数字包,并给出其设计与实现。每个数字包含有16个数据采集通道,每个通道都可以直接连接水听器,而水听器产生的模拟信号被由FPGA控制的24-bit高精度 Δ - Σ ADC实时采集。同时,基于串行并发总线结构,设计和实现了系统的实时控制和远距离数据传输与同步。测试结果表明:该拖缆数字包满足海洋地震勘探的要求。

关键词:海洋地震勘探;数据采集;现场可编程门阵列;动态范围;总谐波失真

中图分类号:TP274 **文献标志码:**A

Design and Realization of Digitizer for Marine Seismic Exploration

Wu Zenghai, Song Kezhu, Cao Ping

(1. State Key Lab of Particle Detection & Electronics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, 230026, China;
2. Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei, 230026, China)

Abstract: A reliable high-precision and high-performance streamer cable digitizer for marine seismic exploration is proposed. In the precise digitizer, there are total 16 data acquisition channels, each of which can be connected to hydrophones directly. Analog signals are digitized by 24-bit high precise Δ - Σ ADCs controlled by field programmable gate array (FPGA) in real time. Schemes of real time system control and remote synchronization are also well designed and realized in the digitizer based on the architecture of serial concurrent bus which is implemented by FPGA. The results indicate that the digitizer can meet the requirements of marine seismic exploration.

Key words: marine seismic exploration; data acquisition; field programmable gate array (FPGA); dynamic range; total harmonic distortion

引 言

海洋地震勘探是通过探测地层对人工产生的地震波的反射声波,反演海底地质结构,探测海洋油藏。随着海洋油藏复杂程度的增高和海洋油气田勘探开发难度的加大,需要更精细的地震方法应用于油藏的评估,因此要求新的地震采集技术进一步提高时空分辨能力,以获得信息更全的地震资料^[1]。因此,本文设计和实现了一种用于海洋地震勘探的高性能高精度拖缆数字包。为了满足三维地震勘探高分辨率的要求,拖缆数字包需要达到比

较高的电子学指标,比如:高动态范围(高于120 dB)、合适的信号带宽(5~500 Hz,1 kHz采样率下)和高增益一致性(高于99%),等。同时,由于地层的反射声波相对于海洋环境噪声非常微弱,因此要求数字包具有极低的电路噪声和极高的共模抑制比。

本文提出了一种高性能、高精度、高密度的数字包结构。该结构的数字包由供电单元、数据传输单元、信号采集单元和两个互联单元组成。每个结构单元均为一印刷电路板。经过长时间充分测试,该数字包能够达到上文提到的各项指标要求,且结构上具有良好的可靠性、灵活性和可扩展性。

在国内外的同类地震数据采集系统中,有系统采用分布式结构的数字包^[2],采集单元与传输单元分离,传输单元管理控制其左右的采集单元,采集单元被封装在拖缆中,导致一旦成缆后,数字包检修困难。本文提出的数字包结构,包含了采集与传输模块,安装于拖缆之间,易于检修。也有系统采用在海底铺设拖缆和数字包^[3],这样可以降低海水引入的噪声,但需要每个数字包单独供电,而且施工困难,且道间距较大。本文提出的数字包采用船上高压电源统一供电,单个数字包含有 16 个采集通道,道间距为 6.25 m,大大提高了系统分辨率。

1 数字包结构

海洋地震勘探系统由水下数据采集与传输子系统和船上主控与记录子系统组成。其中,水下数据采集与传输子系统由拖缆数字包(Streamer cable digitizer, SCD)和拖缆单元(Streamer cable unit, SCU)串联而成,并被拖曳于探测船后。船上主控与记录子系统包含工控计算机(含嵌入式的水下数据接收处理模块)、工作站上的系统软件和存储设备。在勘探工作中,船尾的高压气枪阵列产生声波源信号。当声波信号在海水和地层中传播时,海底和不同的地质层会反射声波。反射的声波信号会在分布于拖缆单元中的水听器上产生压力。压力通过水听器被转换为模拟信号,经过模数转换器(Analog-to-digital converter, ADC)数字化后,经数字包传送给船上主控与记录子系统^[4]。得到的地震数据经过初步数据分析处理、图像显示,然

后有效数据将被存储到磁盘阵列和磁带机中。同时,系统支持在线的水听器故障定位及指标测试。

水下拖缆的结构如图 1 所示。每个长度为 100 m 的拖缆单元中分布有 16 组水听器,并且由数字包串接起来。每个拖缆数字包管理 16 组水听器(两端各 8 组),并通过拖缆单元中的高速数据传输线(6 类双绞线)进行通信。

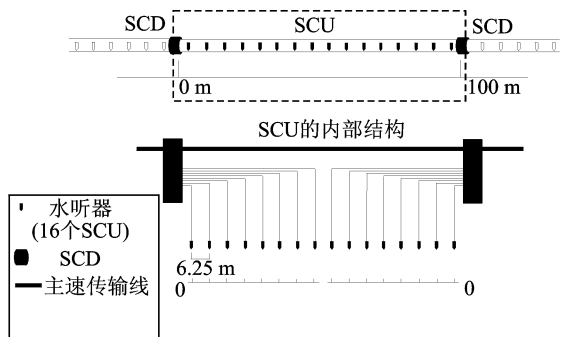


图 1 水下拖缆结构

拖缆数字包是水下数据采集与传输子系统的核心模块,主要负责数据采集、传输、协议解析、电源管理、状态监视和拖缆单元间的物理连接。拖缆数字包的结构如图 2 所示。供电单元(Power supply unit, PSU)将高压交流电转换为低压直流电,并为其他单元提供电源管理。数据传输单元(Data relay unit, DRU)的作用是接收和转发控制命令、上传采集数据、监视系统状态,同时控制下级数字包的开关。信号采集单元(Signal acquisition unit, SAU)负责 16 个通道的数据采集、测试信号的产

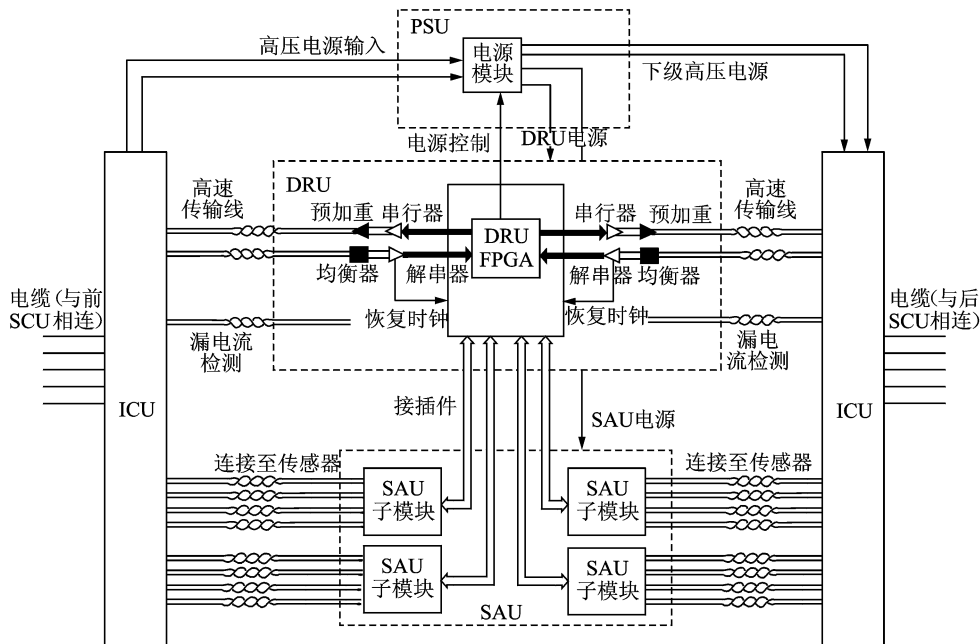


图 2 拖缆数字包结构

生和各种测试模式的实现。互联单元负责将数字包中的其他 3 类单元进行整合加固连接,并实现本地数字包中信号电源线的互联。每个数字包中有两个互联单元,结构完全一样。

2 信号采集单元设计

每个信号采集单元由 4 个采集模块组成。各采集模块之间是相互独立的,并且都通过接插件与

数据传输单元相连。每个采集模块含有 4 个信号采集通道,从数据传输单元接收控制命令和上传采集数据。信号采集单元的结构如图 3 所示。

每个采集模块采集 4 道模拟信号,由前端模拟开关网络、RC 滤波网络、前置放大器、 $\Delta-\Sigma$ ADC、 $\Delta-\Sigma$ DAC、DSP 和连接到数据传输单元的接插件组成。采集模块的结构如图 4 所示。为了在线评估数字包,由 $\Delta-\Sigma$ DAC 产生的直流测试信号和正

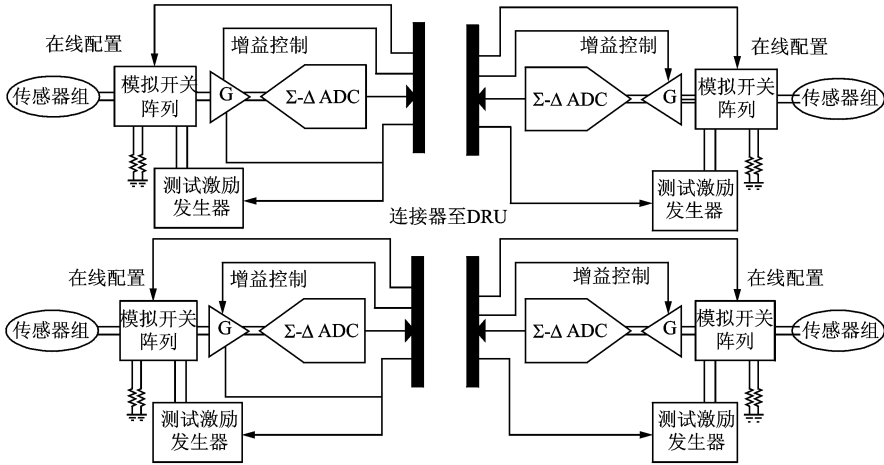


图 3 信号采集单元的结构

弦测试信号可以通过前端模拟开关网络进入采集通道。同时,利用水听器的电阻电容测试算法^[5],就可以方便地在线监测水听器状态和定位故障。RC 滤波网络对模拟信号进行高切和低切的信号调理,同时对 ADC 输入信号进行抗混叠滤波。前置放大器采用高阻抗可编程控制的差分放大器 CS3302,该放大器的增益可以由 FPGA 直接配置以满足不同条件的需要。采集模块中采用 CS5372/CS5376 作为数据采集芯片。CS5372 是双通道的低功耗 24 bit $\Delta-\Sigma$ ADC,工作在过采样频率 512 kHz 下。CS5376 是 4 通道的数字滤波处理器,可以同时接受 4 通道的 $\Delta-\Sigma$ 数据流,完成抽取

滤波的功能,并能完成梳状滤波、有限脉冲响应(Finite impulse response, FIR)滤波及无限脉冲响应(Infinite impulse response, IIR)滤波。为了实现在线测试,采集模块中含有一个高精度的 $\Delta-\Sigma$ DAC CS4373A,该 DAC 从 CS5376 接收测试数据流,为系统提供高精度多通道的测试信号。交流正弦信号用来测试系统的动态指标,如共模抑制比,总谐波失真等,同时直流及脉冲信号通过模拟开关的选通可以测试系统的带宽和水听器的电阻电容。

3 数据传输单元设计

数据传输单元接收船上主控与记录子系统的控制命令和配置信息,同时通过数据流线上采集数据及状态信息。数据传输单元也负责监控数字包状态和管理数字包序列号。FPGA 是数据传输单元的核心,通过接插件向信号采集单元发送命令和获取采集数据。长距离的数据传输主要是由 2 套串并/并串转换器和线缆驱动器/均衡器来完成的,两个数字包直接通过 100 m 的 6 类线缆相连。在 12 MHz 的系统时钟下,数据传输率达到了 144 Mb/s,满足系统数据传输率的要求。数据传输单元的基本框图如图 5 所示。

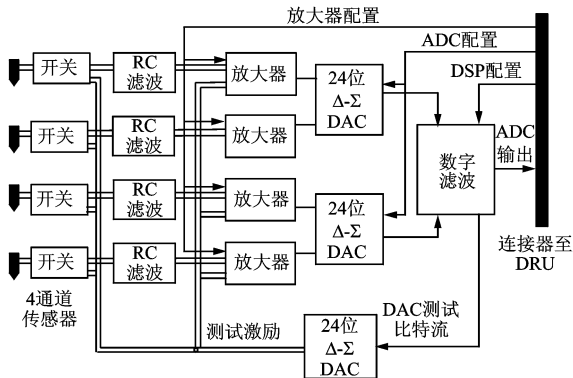


图 4 采集模块的结构

FPGA 是数据传输单元的核心,实时地控制数据采集和传输。数字包上电以后,FPGA 内部的逻辑自动初始化配置信号采集单元和数据传输单元,同时准备接受上面发下来的命令。FPGA 的逻辑采用模块化设计,主要包括:

(1)方向判别模块。由于数字包的对称结构,可以自由安装,故要求数字包能自动区分前后方向。

(2)数据收发模块。主要控制数据和命令通道的数据流,使其流水线传输。

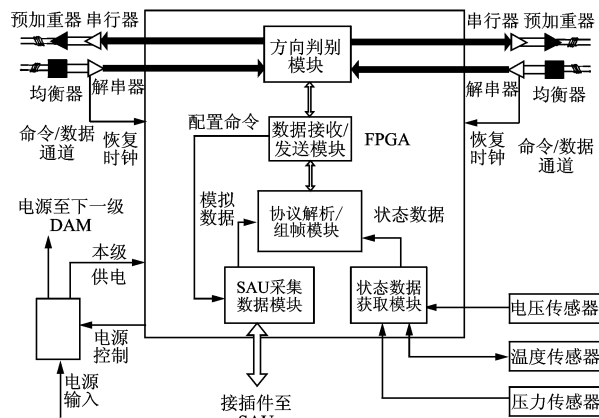


图 5 数据传输单元框图

(3)数据打包及协议处理模块。完成系统命令的解析,以及上传数据的按协议打包。

(4)数据获取模块。通过信号采集单元中的 CS5376 串行接口获取采集数据,同时对数据进行缓存。

(5)状态监视模块。通过与数字包中的状态采样 ADC 的通信,获取数字包的温度、压力、电压和电流等信息,监控整个数字包状态,同时将状态数据上传。

基于串行并发总线结构^[6],数据传输单元含有两条传输通道,即:下行命令通道和上行数据通道。传输通道中的数据都是以帧的格式进行传输的^[7],同时为了直流平衡,传输的数据都采用 8 b/10 b 编码。上行数据通道帧格式为:帧起始、时间信息、序列号、帧类型、环境信息(温度、压力、电压等)、模拟采集数据、数据校验、帧结束。当数字包收到系统采集触发信号时,时间戳可标记出系统开始采样时刻的数据帧。为了减少协议开销,一个数据帧中含有 4 个采样周期的采样数据。

为了提高传输效率,命令和数据通道都采用了流水线的传输方式。命令通道流水线的实现方式是:当数字包接收到上级命令时,解析命令,同时直接将命令传给下一级数字包。对于数据通道,在系

统同步条件下,所有数字包同一时间完成数据采集,并本地向上进行数据传输。当本地采集数据完成后,数据被放入 FIFO 中缓存,每个数字包都向上级数字包上传本地采集数据,同时缓存来自下级数字包的采集数据。当传输完本地采集数据以后,继续上传下级数字包的采集数据。因此,数字包的采集数据被逐级上传,从而实现了数据通道的流水线设计。数据传输通道的时序如图 6 所示,所有的数据都必须在时间间隙 T (数据帧产生所要的时间,4 个采样周期)内传输至船上主控和记录子系统,以避免有效数据帧的丢失。假定数字包的个数为 N ,数据传输率为 B ,数据帧长度为 D ,数据传输延迟为 t ,因此数据传输率必须满足

$$B > D/(T/N - t) \quad (1)$$

由此,可以得到系统数字包个数 N 必须满足

$$N < T/(D/B + t) \quad (2)$$

在本文的系统中, $B=12 \text{ MB/s}$, $D=200 \text{ B}$, $t=250 \text{ ns}$, $T=4/4k=1 \text{ ms}$ 。由此可以得出数字包个数最多为 60 个,满足系统的要求。

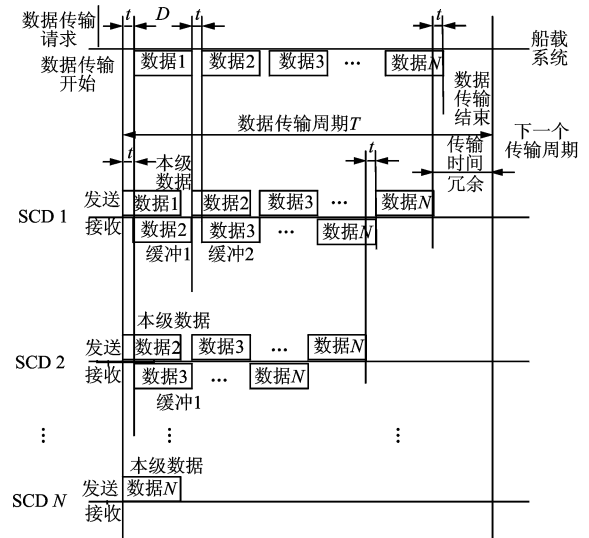


图 6 数据并发传输时序图

4 系统同步设计

在一个实际的系统中,由于采集传输空间上的广域分布,要求系统中各个通道之间都是同步的。对于本文设计的链式结构系统,系统同步主要可以分为时钟同步和命令同步。

4.1 系统时钟同步

由于各个数字包上工作时钟晶振起振的随机性,即使每个晶振频率一致,实际上每个采集单元时钟的初始相位是不一致的,这就体现在采集时刻

的不同步。另一方面,实际上所有的时钟晶振频率是不可能完全一致的,会产生累积效应,导致频率漂移^[8],这又会体现在采集时刻的不同步上。因此,解决时钟同步的方法是数字包信号采样时钟均采用同一时钟源。数字包中系统时钟同步的方法如图 7 所示。在系统工作时,数字包发送数据单元,并在发送数据的同时,将时钟信息包含在内。传输链上所有接收单元首先采用时钟恢复和锁相环(Phase locked loop, PLL)锁相技术,从数据链上提取出时钟信号,再以此时钟作为本级系统工作时钟发送到下一级系统。循环往复,这样就可以保证每个接收单元上恢复的时钟都与上级数字包上发送的时钟保持同频同相,从而达到系统时钟同步的目的。

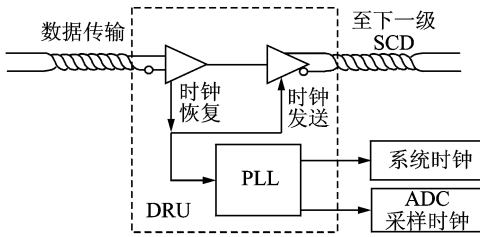


图 7 系统时钟同步框图

系统时钟同步又可分为数字包内部时钟同步和数字包之间时钟同步。在数字包内部,各个信号采集模块的时钟都来自同一个 PLL,保证了数字包内部时钟的同步。在数字包之间,由于各个数字包的时钟都源于上级数字包时钟,保证了数字包之间的时钟同步。为了保证数字包时钟都有时钟,传输通道必须一直处于工作状态,当不传命令和数据帧时,需要传输特定的同步码流^[9]。图 8 是通过 Lecroy WaveRunner 104MXi 示波器测得的,表明了相邻数字包之间的时钟同步。

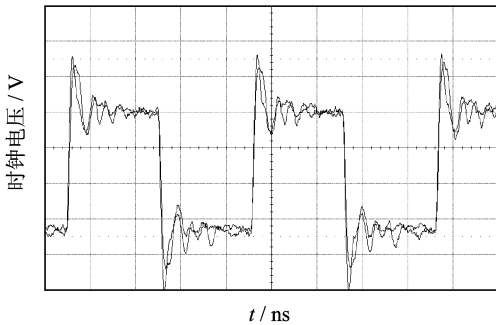


图 8 相邻数字包的时钟

4.2 命令同步

为了保证系统同步,所有数字包必须在同一时

刻响应系统命令,例如开始采集命令。对于 100 m 的电缆上,电信号传输延时约为 $0.5 \mu\text{s}$ 。在 12 MHz 的系统时钟下,每对串行器/解串器的传输延迟为 220 ns。与 ADC 的采样周期(0.25 ms)相比,以上两种传输延迟可以忽略不计。但是对于整个系统含有很多数字包的情况,则需要考虑传播延迟。为了消除传播延迟,在 FPGA 中实现了延时补偿。首先,需要测定各个数字包的信号传播延迟,测试方法见图 9 左上部分。船上主控和记录子系统先发送延时测量命令,由每个数字包记录延时测量命令的时刻,当最后一个数字包接收到此命令后,向前级继续发送该命令,每个数字包记录第 2 次该命令的时刻。如图 9,假定第 1 个数字包两个时刻分别为 $T_{1,1}$ 和 $T_{1,2}$,第 n 个数字包的为 $T_{n,1}$, $T_{n,2}$,由于传输通道是前后对称的,故两个方向上的传输延迟相同。从图 9 中,可以看出第 n 个数字包的延迟补偿为 $(T_{n,2} - T_{n,1})/2$ 。由于已经测量出了不同的数字包延时补偿,只需要在命令执行前增加一个延时模块,通过高精度时钟对不同的数字包进行延时补偿,如图 9 下半部分所示。这样所有的数字包都能在同一时刻响应系统命令,从而达到了命令同步的要求。

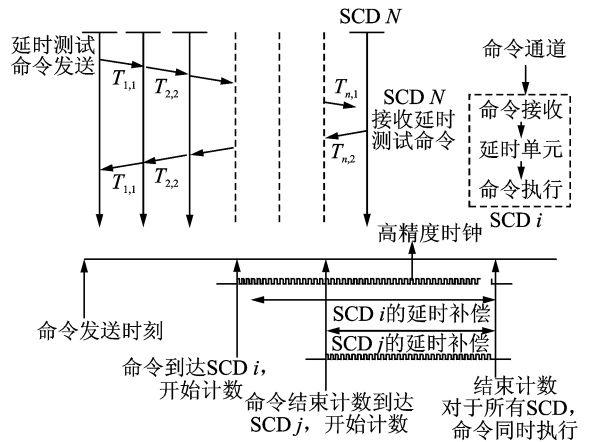


图 9 传输延时的测量和补偿

5 数字包性能测试

根据 The Society of Exploration Geophysicists (SEG) 制定的行业规范,对地震采集仪器的性能指标测试给出了一系列参数的定义、测量办法和具体算法^[10]。主要包括:系统的谐波失真、噪音、带宽、动态范围、道间串扰等。为了评估数字包性能,本文在数字包中设计了高性能的信号产生源,可以为不同的测试项目提供不同的测试信号。采集到的测试信号可以直接被船上主控与记录子系统的软件分析和显示^[11]。这里列举了几个重要指标。

(1)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,即

$$DR = 20 \lg \frac{\text{Signal RMS}}{\text{Noise RMS}} \quad (3)$$

从图 10 可以看出系统仪器噪声小于 $1.3 \mu\text{V}$, 仪器噪声为 $1.2 \mu\text{V}$ (均方根值),动态范围达到了 120 dB 以上。

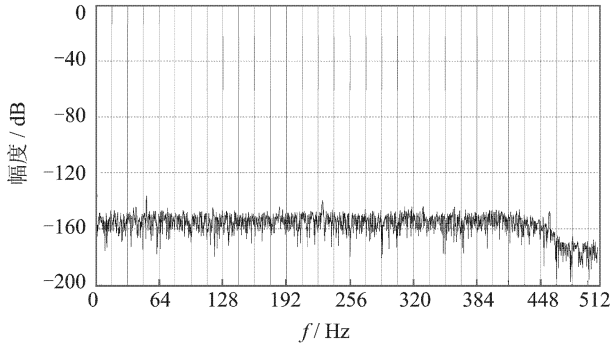


图 10 系统仪器噪声测试

(2)总谐波失真(Total harmonic distortion, THD):谐波失真表征系统对于理想正弦输入信号的非线性失真。总谐波失真定义为谐波与信号幅度两者的均方根值的比值,一般计算前 5 次谐波,并用分贝(dB)表示

$$THD = 20 \lg \frac{\text{RMS}_{(\text{first 5th HD})}}{\text{RMS}_{\text{Signal}}} \quad (4)$$

如图 11 所示,系统 THD 好于 -112 dB ,总谐

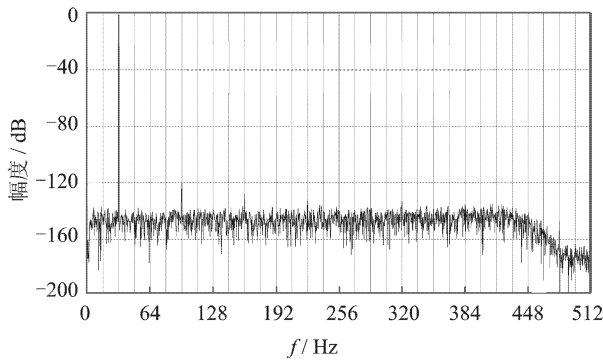


图 11 系统总谐波失真测试

波失真为 -116 dB ,输入信号为 31.25 Hz 的正弦信号。

(3)系统带宽(Bandwidth):系统带宽为系统对输入脉冲信号的响应。从图 12 可以看出,系统的带宽为 $2.2 \sim 450 \text{ Hz}$,输入脉冲宽度为 0.5 ms 。低频截止频率为 2.2 Hz ,高频截止频率为 450 Hz 。

表 2 给出了数字包的性能测试结果,所有结果都在 1 kHz 采样率下测得,FFT 数据个数为 4 096。

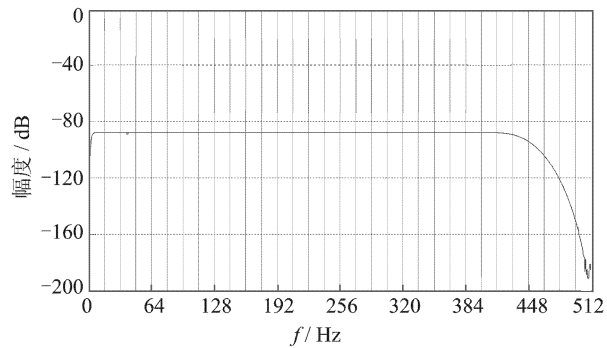


图 12 系统带宽测试

表 3 为系统数字包与国外同类系统的性能对比,从对比结果可以看出该数字包性能达到了国际同类系统的性能,能够满足海洋地震勘探的要求。

表 2 数字包性能测试结果

测试项目	结果
仪器噪声	$\leq 1.3 \mu\text{V}$ (RMS)
动态范围	$\geq 120 \text{ dB}$
增益一致性	$\geq 99\%$
共模抑制比	$\geq 106 \text{ dB}$
通道间串扰	$\leq -132 \text{ dB}$
总谐波失真	$\leq -110 \text{ dB}$
带宽	$2.2 \sim 450 \text{ Hz}$
输入范围	$\pm 2.5 \text{ V(p-p)} / \pm 1.768 \text{ (RMS)}$
前置放大器增益	$0, 6, 12, 24 \text{ dB}$

表 3 该系统与国外同类系统对比

系统	DigiSTREAMER	RDA	ALS	Q-Marine	本文系统
数字包间距/m	99.7	74.5	150	100	100
采集通道间距/m	12.5	12.5	12.5	3.125	6.25
数字包通道数	8	8	12	32	16
ADC 类型	$\Delta-\Sigma$ 24 bit	$\Delta-\Sigma$ 24 bit	$\Delta-\Sigma$ 24 bit	$\Delta-\Sigma$ 24bit	$\Delta-\Sigma$ 24 bit
前置放大器增益/dB	0, 12, 24, 36	12, 24, 36, 48	N/A	N/A	0, 6, 12, 24
动态范围/dB	>114	>114	>114	>115	≥ 120
总谐波畸变/dB	<-106	<-105	N/A	<-95	≤ -110

6 结束语

本文给出了一种高精度、高性能的海洋地震勘探数字包的设计与实现。该数字包通过实验室及近海环境的测试后表明,系统的实时控制、数据采集及远距离数据传输均可靠工作,运行稳定,达到了设计要求。该结构的数字包对其他相关地震勘探和遥感系统均有一定的参考价值和借鉴意义。

参考文献:

- [1] Pinder D. Offshore oil and gas: Global resource knowledge and technological change [J]. *Ocean & Coastal Management*, 2001, 44(1): 579-600.
- [2] 王超,宋克柱,唐进.高性能水下地震数据采集系统设计及实现[J]. *吉林大学学报*,2007,37(1):168-172.
Wang Chao, Song Kezhu, Tang Jin. High performance data acquisition system for marine seismic survey[J]. *Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition*, 2007, 37(1): 168-172.
- [3] Shahram P, Manuel A, Bermudez A, et al. Ocean bottom seismometer (OBS): An instrument for marine seismic data acquisition [C]//2008 IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Cambridge, United Kingdom: IEEE Computer Society Press, 2008: 1183-1186.
- [4] Cheng Jingyuan, Song Kezhu, Wang Yanfang, et al. Data gathering and transferring sub-system designing of time-lapse marine seismic data acquisition and recording system[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2006, 14(2): 181-193.
- [5] Cao Ping, Ruan Fuming, Zhang Keli, et al. Method of on-line resistance and capacitance measurement of piezoelectirc ceramic hydrophones [C]//2009 International Conference on Electronic Measurement & Instruments. Beijing, China: IEEE Computer Society Press, 2009: 535-539.
- [6] Zhang Sifeng, Cao Ping. Design and realization of remote synchronous data transmission system based on distributed architecture of serial concurrent bus [C]//2009 International Conference on Electronic Measurement & Instruments. Beijing, China: IEEE Computer Society Press, 2009: 358-362.
- [7] 王兵,武杰,孔阳,等.数字传感网络的高速数据传输协议设计[J]. *仪器仪表学报*,2010,31(7): 1644-1649.
Wang Bing, Wu Jie, Kong Yang, et al. Design of high-speed data transmission protocol for digital sensor network [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2010, 31(7): 1644-1649.
- [8] 冀峰,赵伟,李荣冰,等. GPS接收机时钟频率漂移误差分析及模型预测[J]. *数据采集与处理*,2010,25(4):544-548.
Ji Feng, Zhao Wei, Li Rongbing, et al. Error analysis and model prediction of GPS receiver clock frequency drift [J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2010, 5(4): 544-548.
- [9] 王东旅,杨俊峰,程宏才,等.地震数据采集系统中的数据传输系统设计[J]. *数据采集与处理*,2011,26(4):494-498.
Wang Donglü, Yang Junfeng, Cheng Hongcai, et al. Data transmission system design in marine seismic data acquisition system[J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2011, 26(4): 494-498.
- [10] Badger A S. Special report on digital seismic recorder specification standards by SEG subcommittee on digital seismic recorder specifications [J]. *Geophysics*, 1988, 53(3): 415-416.
- [11] 曹平,宋克柱,陈佳,等.海洋石油勘探数据采集与记录系统主控软件设计与实现 [J]. *中国科学技术大学学报*,2006,36(3):258-263.
Cao Ping, Song Kezhu, Chen Jia, et al. Design and realization of system monitor software on the offshore oil prospect data acquisition and recording system [J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2006, 36(3): 258-263.

作者简介:吴增海(1986-),男,博士研究生,研究方向:高速数据采集与处理,E-mail:wuzenghai@gmail.com;宋克柱(1966-),男,副教授,研究方向:高速数据采集与处理;曹平(1980-),男,副教授,研究方向:高速数据采集与处理。

