

文章编号: 1671-7449(2024)02-0147-07

# 基于AD7616的16通道数据采集系统设计

蔺红彦, 尚禹\*, 韩建宁, 邢晨茹, 郝国栋

(中北大学 信息与通信工程学院, 山西 太原 030051)

**摘要:** 针对传统数据采集系统因通道不足或数据量过大, 无法满足多通道同步采集的问题, 设计了一种基于AD7616的16通道数据采集系统。系统以Xilinx系列FPGA作为主控芯片, ADI公司的AD7616作为模数转换芯片, DDR3 SDRAM作为缓存单元。介绍了各个模块硬件的设计思路, 重点介绍了FPGA控制AD7616模数转换模块、DDR3 SDRAM缓存模块的软件程序设计, 并对系统的多通道采样功能、同步性能以及实际水下超声信号的采集能力进行了实验验证, 结果表明, 系统可以完成水下超声信号的多通道同步采集。

**关键词:** 多通道数据采集; 数据缓存; AD7616; Artix-7; DDR3 SDRAM

**中图分类号:** TN919.5 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1671-7449.2024.02.007

**引用格式:** 蔺红彦, 尚禹, 韩建宁, 等. 基于AD7616的16通道数据采集系统设计[J]. 测试技术学报, 2024, 38(2):147-153.

LIN Hongyan, SHANG Yu, HAN Jianning, et al. AD7616-based 16-channel data acquisition system design [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2024, 38(2):147-153.

## AD7616-Based 16-Channel Data Acquisition System Design

LIN Hongyan, SHANG Yu\*, HAN Jianning, XING Chenru, HAO Guodong

(College of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** A multi-channel data acquisition system based on AD7616 is designed to address the problem that traditional data acquisition systems cannot meet the simultaneous acquisition of 16-channel data due to insufficient channels or excessive data volume. The system uses Xilinx series FPGA as the main control chip. The AD7616 from ADI is used as the analog-to-digital conversion chip. The DDR3 SDRAM is used as the cache unit. The article first introduces the design idea of each module hardware, then focuses on the software program design of the FPGA control AD7616 analog-to-digital conversion module, DDR3 SDRAM cache module. And the system's multi-channel sampling function, synchronization performance and the actual underwater ultrasonic signal acquisition capability are experimentally verified, and the results show that the system can complete the multi-channel synchronization acquisition of underwater ultrasonic signals.

**Key words:** multi-channel data acquisition; data cache; AD7616; Artix-7; DDR3 SDRAM

## 0 引言

随着国家经济实力不断增强, 我国举办的水上体育赛事、会议、展览等越来越多, 相关的水下

安保工作越来越受到重视, 而传统的光学、电磁波等, 很难在水下有效发挥作用。超声因其指向性好、易聚焦、受水介质影响小等优势, 逐渐成为水下成像、水下探测的主要技术手段。

收稿日期: 2023-03-17

基金项目: 山西省基础研究计划资助项目(202103021224201, 202203021211100); 国家自然科学基金资助项目(61671414)

作者简介: 蔺红彦(1999-), 女, 硕士生, 主要从事数据采集存储的研究。E-mail: 1650127945@qq.com.

\*通信作者: 尚禹(1976-), 男, 教授, 博士, 主要从事近红外光技术、医学成像、生理系统建模等研究。E-mail: yushang@nuc.edu.cn.

传统的输入通道少的AD芯片已经不足以满足超声信号采集系统大量信号同步采集的要求,因此,为保证水下超声信号的高速精确采集,选取高精度的AD转换模块、高效的主控芯片以及大容量的存储单元进行数据采集具有极大的实践意义<sup>[1]</sup>。数据采集系统中采用高性能的AD芯片,不仅可以增强处理速度,而且能提高采集系统的稳定性。利用FPGA作为主控芯片的采集系统,相比于使用单片机进行控制,数据处理速度更快、实时性更好、接口数量更多且易于实现<sup>[2]</sup>。DDR3 SDRAM具有高集成度、快速传输速度和低成本的特点,在当前拥有较高的市场份额。本设计选用Xilinx公司的Artix-7系列开发板(芯片型号为XC7A35T),控制AD7616芯片实现最高16通道数据采集,开发板板载2块DDR3 SDRAM芯片可对16路高速数据进行缓存,系统通道数量更多,采样精度更高,可以用于水下超声检测<sup>[3]</sup>。

## 1 硬件设计方案

### 1.1 FPGA 硬件设计

设计选择赛灵思的Artix-7系列开发板,型号为XC7A35T,作为系统的主控芯片进行核心部分的逻辑开发。如图1所示,Artix-7 FPGA采用小巧紧凑的封装,占位面积非常小。

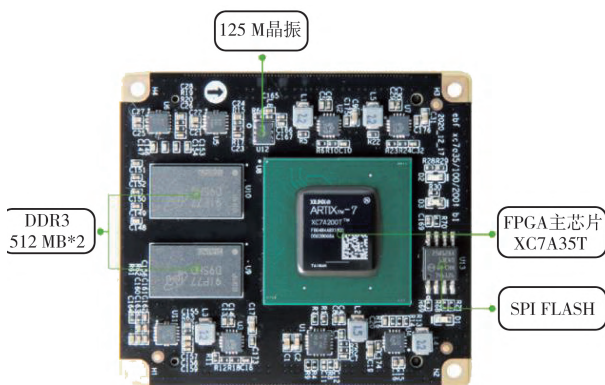


图1 Artix-7硬件资源

Fig. 1 Artix-7 hardware resources

Artix-7系列开发板核心板板载频率为50 MHz的有源晶振为主芯片提供系统时钟,同时板载两颗DDR3 SDRAM芯片,每颗存储容量为512 MB,共1 GMB,在本设计中用于大容量数据缓存,因此,无需在系统中外接DDR内存条,仅使用一块开发板便可完成整体数据采集系统设计,一方面提高了系统的集成度,另一方面节约

了开发所需经费。

### 1.2 AD模块硬件设计

A/D转换模块使用AD7616芯片,这是一个16 b数据采集芯片,支持16个通道的同步双路采样。片上滤波和高输入阻抗解决了对前端信号处理电路的需求,从而解决了对控制运算放大器和外部双极电源的需求<sup>[4]</sup>。AD7616芯片在配置上需要根据采集需求合理选择,其中包括基准电压、I/O接口电压、串/并行、硬/软件模式等<sup>[5]</sup>。在本设计中,基准电压选择内部基准、接口电压选择+3.3V、选择硬件模式、并行控制。AD7616与FPGA接口连接原理如图2所示。

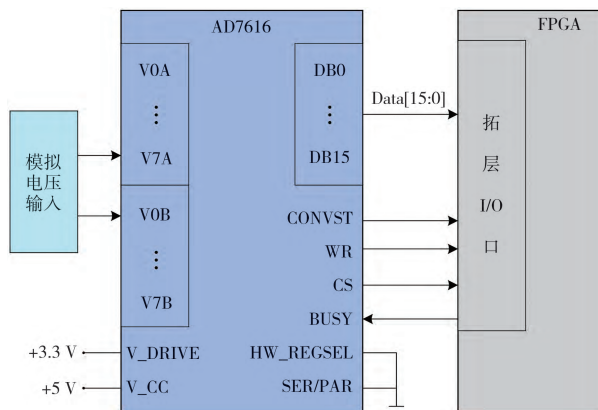


图2 AD7616与FPGA连接原理图

Fig. 2 AD7616 and FPGA connection schematic

V0A-V7A以及V0B-V7B为16路采样模拟电压输入接口,A/D转换后的16路数据通过DB0-DB15与FPGA的拓展I/O接口相连接,SER/PAR接地选择并行模式,HW\_REGSEL接地选择硬件模式,模拟电源电压V\_CC由+5V的电源提供,逻辑电源输入V\_DRIVE由+3.3V的电源提供。此外,CONVST,WR、CS#,BUSY这些模数转换的控制信号均与FPGA相连接,由FPGA产生读写时序控制A/D转换过程。

### 1.3 DDR3 SDRAM 硬件设计

经过AD模块转换后的数据最终需要上传到上位机,但上位机无法直接从AD模块的接口中获取数据,同时又因为FPGA内存资源有限,需要设计缓存模块,将来自AD模块的数据经数据拼接转换成串行数据后存入DDR3 SDRAM缓存模块中,存满则发送到上位机。

设计中的DDR3 Chip为FPGA外挂的DDR3颗

粒,采用了两块镁光 MT41K256M16 型 DDR3 芯片颗粒。MT41K 指的是产品系列型号,256 M 16 表示该 DDR3 芯片颗粒的存储容量是 256 M×16 bit,为 512 MB,两块芯片的存储容量一共是 1 GB<sup>[6]</sup>。

DDR3 芯片的物理接口可分为电源、数据、控制、时钟和地址接口 5 类<sup>[7]</sup>。

电源部分包括芯片主电源 VDD、数据线的供电电源 VDDQ 等;数据信号包括 16 b 数据信号 DQ、数据选取脉冲差分信号 DQS\_P/N、掩码信号 DM;控制信号包括时钟使能信号 CKE、片选信号 CS#、阻抗 ODT、行/列使能信号 R/CAS#、写使能信号 WE#、复位信号 RESET#;时钟信号为一对差分信号 CK\_P/N。

地址信号包括 bank 线 BA [2:0]、地址线 ADDR [14:0], bank 线用于选择一块芯片中的不同 bank, 15 b 地址线 ADDR [14:0], 行列地址分时复用,行地址有 32 K 个,列地址有 1 K 个。寻址时利用 BANK-ROW-COLUMN 的形式,这是一种最常规的 DDR3 寻址方式,即要指定某个地址,先后给出 BANK 地址、行地址、列地址,这样就确定了一个具体地址。这样的寻址方式虽然有利于降低功耗,但在设计过程中直接控制 DDR3 引脚的时序更加复杂,所以 XILINX 平台提供 MIG IP 核来提供辅助<sup>[8]</sup>。

### 1.4 系统总体设计

本文设计的多通道数据采集系统主要由 AD 数据采集模块、DDR3 数据缓存模块、FPGA 主控模块组成。系统总体框图如图 3 所示。

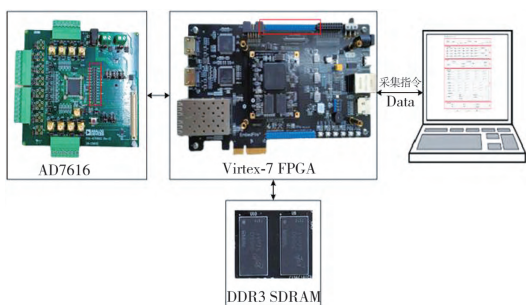


图 3 系统总体结构框图

Fig. 3 Block diagram of overall system structure

系统上电启动后,上位机发送采集指令, FPGA 通过控制具有 16 bit 的高精度模数转换芯片 AD7616 对于 16 路的模拟信号分 2 线进行采样,并将其转换为数字信号。转换后的数据经 FPGA 主控模块的控制,暂存到 DDR3 SDRAM

缓存模块,数据存满以后,进一步将其上传至上位机,完成一轮数据采集任务。

## 2 软件程序设计

采集系统的软件设计重点是 FPGA 编写控制程序,其中包括 FPGA 主控模块设计、AD 模数转换程序设计、DDR3 数据缓存程序设计。AD 模数转换程序主要是 FPGA 控制 AD 进行数据采集时序控制和模拟信号的转换。DDR3 数据缓存程序中运用乒乓操作,开辟一个真双口 RAM 并调用 FIFO,以解决 DDR3 无法同时进行读写操作的问题。同时将缓存数据、命令接口封装成 AXI4 接口,方便与上位机进行数据交互。

### 2.1 AD 模数转换模块

AD7616 内置两个 16 b 逐次逼近型 ADC 芯片以进行双路同步采样,它支持并行工作模式,能够将 A/D 转换后的 16 b 数据传至 FPGA 当中。根据设计要求,AD7616 模数转换芯片采用双路并行工作模式,两个 ADC 对应一个 CONVST 信号, FPGA 通过控制 CONVST 信号实现双路同步采样的启动。具体的通道选择由 CHSEL 信号控制,该信号的电平代表了复位信号释放后进行转换的通道数。在本设计中选择硬件模式,序列器能够通过加一选择下一通道的方式来完成 V0A/V0B 到 V7A/V7B 通道的顺序采样。

根据图 4 的读时序图,采样结束后 BUSY 信号置低,采样保持器返回跟踪模式,这时 FPGA 可以通过拉低 CS 和 RD,将转换后的数据输出到数据总线 DB15 至 DB0 来并行读取数据, BUSY 信号置低时, CS, RD 信号同时置低,开始从低到高回读第 1 路转换数据,之后拉高再次置低可回传第 2 路数据。

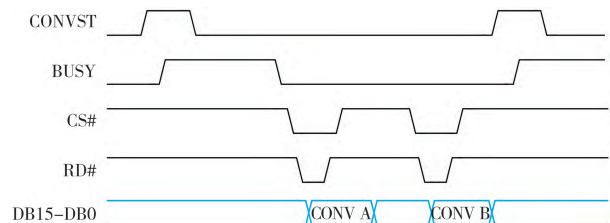


图 4 回读转换数据时序图

Fig. 4 Readback conversion data timing diagram

根据以上工作原理,设计 AD7616 硬件并行模式工作状态机以完成 FPGA 对 AD 模块的控制逻辑,状态机如图 5 所示,实现方法如下:

IDLE为空闲状态；当CONVST和数据锁存信号LOCK都置0时，芯片进行初始化进入STATE\_0状态；当CONVST置1，芯片启动采样进行模数转换，进入采样STATE\_1状态；BUSY信号为1则保持采样状态，同时CHSEL信号加1转到下一通道进行采样，BUSY信号为0则表示转

换结束，此时进入STATE\_2可读状态；当LOCK置1且RD置0时，读取通道A的转换数据，状态为STATE\_3；读完一路数据后，LOCK信号置0锁存下一通道B的数据，同时RD信号置1，读取通道B的转换数据，状态为STATE\_4；LOCK置1、RD置0后回到空闲状态IDLE。

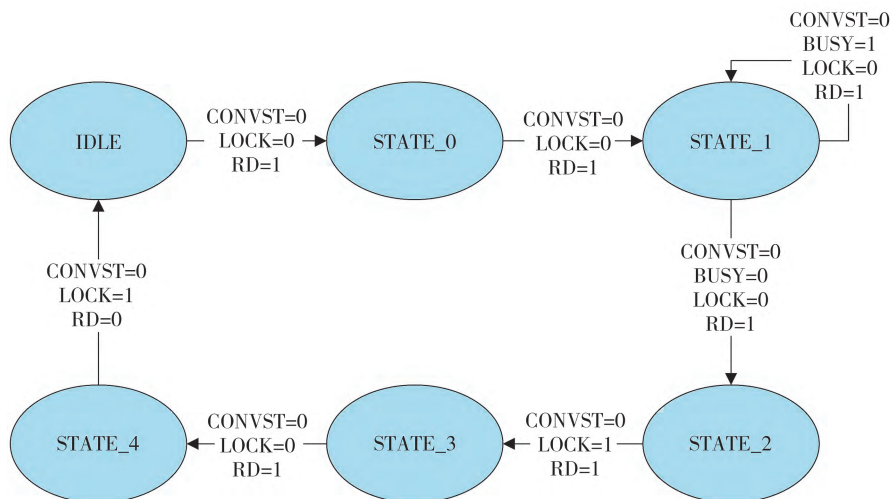


图5 AD7616采样、读写状态机

Fig. 5 AD7616 sampling、read/write state machine

### 2.2 DDR3数据缓存模块

为了更加高效地开发DDR3存储器，选用Vivado提供的MIG IP核存储控制器作为控制器，MIG IP核包括物理接口模块、存储控制器模块和

用户接口模块<sup>[9]</sup>。用户必须首先根据数据手册在配置页面配置接口时钟、电压、存储器类型、位宽和其他参数<sup>[10]</sup>。MIG IP核配置完成，意味着实现了FPGA与物理接口模块的连接，接下来考虑用户接口模块的读写操作。

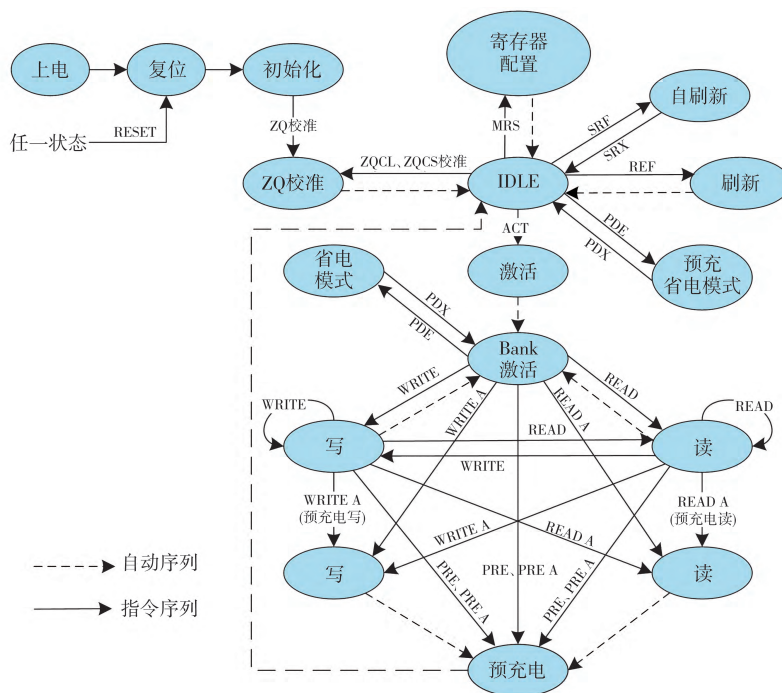


图6 DDR3 SDRAM读写状态机

Fig. 6 DDR3 SDRAM read/write state machine

DDR3 的工作机制就是通过控制器控制状态转换, 由图 6 中 DDR3 SDRAM 的状态机可见, DDR3 在完成上电、复位、ZQ 校准等一系列操作后, 进入空闲状态等待控制器激活, 进入激活状态后对指定的 Bank 进行激活操作, 之后控制器发送不同的指令, 状态机进入读、写、预充电、低功耗等状态, 完成对 DDR3 SDRAM 的读写操作。

由于 DDR3 SDRAM 不能同时进行读、写操作, 设计中采用乒乓操作来实现一端接收来自 AD 模块的转换数据, 一端向上位机发送数据。整个缓存模块在物理上将两颗 DDR3 芯片分为 A 块和 B 块, 由于上位机和 DDR3 缓存模块之间需要传递采集命令和可以采集标志信号, 因此, FPGA 需

要开辟一个真双口 RAM, 同时调用 FIFO 来完成数据流的乒乓操作。

如图 7 所示, 当上位机发出采集指令后, FIFO 写使能拉高, 将来自 AD 模块的转换数据写入 FIFO, 同时判断 A, B 块 DDR 的读写状态 state, 为 0 时 FIFO 向 A 块 DDR3 写入数据, 写入完成后向上位机发送可采集信号, 通知上位机取数, 同时将 state 转换为 1, FIFO 向 B 块 DDR3 写入数据, 此时上位机从 A 块 DDR3 读取数据; 同理, B 块 DDR3 写入完成后 state 转变为 0, 上位机从 B 块 DDR3 读取数据, FIFO 向 A 块 DDR3 写入数据, 以此规律循环操作, 两块 DDR3 芯片分别读写, 实现乒乓操作。

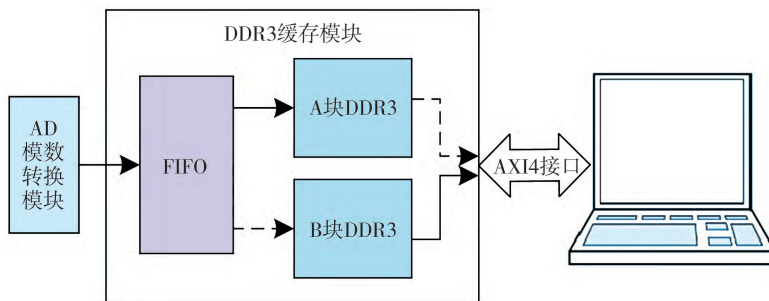


图 7 DDR3 缓存数据流向示意图

Fig. 7 DDR3 cache data flow diagram

AXI4 接口采用 Valid 和 Ready 信号保持主从设备的独立性, 协议规定 5 个独立的信号传输通道, 读写地址通道由主设备发出地址和控制命令, 读写数据通道用来完成数据传输, 写响应通道由从设备返回写操作完成信号。此外, AXI4 协议基于突发传输机制, 突发宽度是一次数据传输的最大数据位, 这里选择 256 b, 突发长度是一次突发所传输的次数。

### 3 实验结果

首先, 对系统的多通道采样功能进行验证, 将信号发生器生成的 2 V 和 4 V 直流信号分别接入 3, 6, 9, 12, 15 通道, 如图 8, 上位机软件对系统采集上传的数据进行显示, 上位机软件在 VC++6.0 开发环境下开发, 可以看到电压数值与输出电压相同, 证明系统的多通道采集功能测试成功。



图 8 多通道采集效果图

Fig. 8 Multi-channel acquisition effect diagram

其次, 为测试系统采集的同步性, 使用 Vivado 内部集成的仿真工具进行逻辑仿真验证,

将信号发生器生成的测试信号接入 AD7616 的采集通道, 由于 AD 芯片是双路同步采样, 所以只需

要对8路信号进行分析。如图9所示,为4路不同通道的信号,4路均取并行数据的第一个实数点进

行分析,能够看到AD模块实现了同步采集。

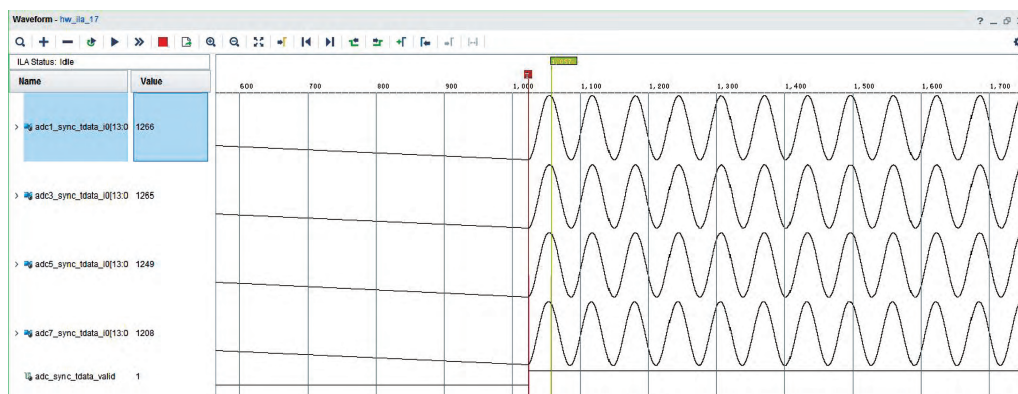


图9 信号同步测试波形图

Fig. 9 Signal synchronization test waveform

为验证系统能否实际采集到超声信号,对整个系统进行水下超声采集验证,如图10所示,将两个超声换能器分别与信号发生器和AD7616采集芯片连接,并置于水中进行实验验证,信号发生器生成频率为20 kHz、幅值为2 V的正弦波信号,经由换能器A发射,换能器B将接收到的超声信号转换为电压信号,采集系统将采集到的电压信号数据存储上传,使用Matlab进行波形重建,重建结果如图11所示,可以看到信号并未发生明显失真,表明系统能够用于水下超声信号的采集。

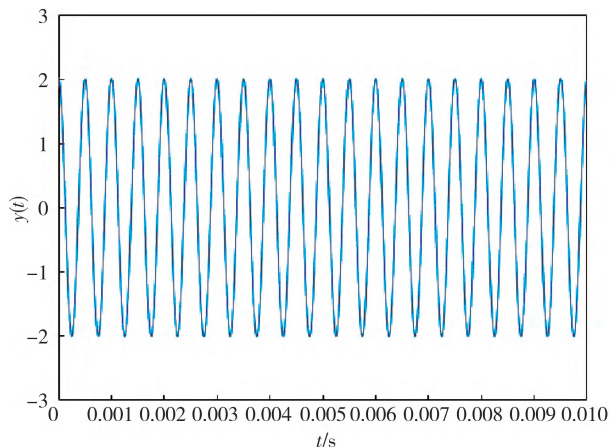


图11 信号波形重建图

Fig. 11 Signal waveform reconstruction diagram

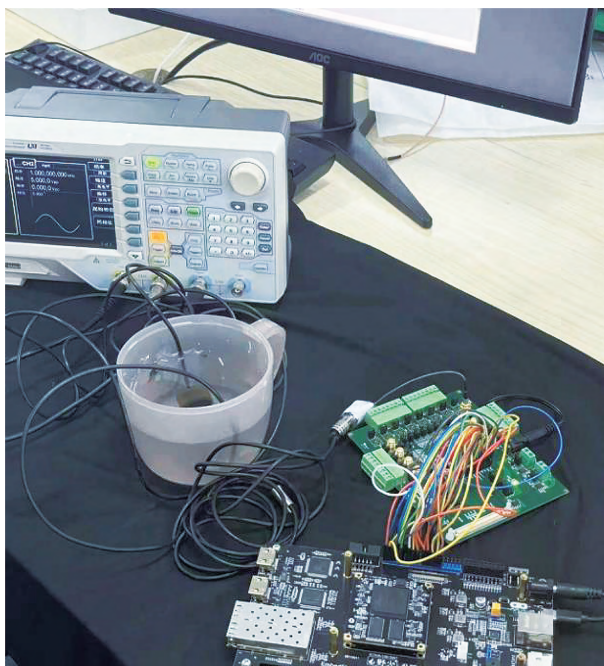


图10 水下超声信号采集实验图

Fig. 10 Diagram of underwater ultrasonic signal acquisition experiment

### 4 结语

本文介绍了多通道数据采集系统的设计目的,详细阐述了系统各个模块的硬件电路设计和软件程序设计,通过仿真和实验验证,该系统的可行性和准确性得到了充分证明。整个系统得益于AD7616的多通道数、高采样率,以及DDR3 SDRAM的大容量缓存空间,配合采用FPGA作为主控芯片,能够对16路信号进行同步采集,提高了系统的可扩展性,使系统具有更强的数据采集能力。该系统还具有高度的灵活性和便携性,使其适用于具有高数据量和多通道要求的广泛的采集环境,同时为超声监测系统提供了新的可能。

### 参考文献:

[1] 毛超波, 伍红成. 基于FPGA的八通道同步采集系统的设计[J]. 石油仪器, 2013, 27(2): 1-3.  
 MAO Chaobo, WU Hongcheng. Eight-channel syn-

- chronous acquisition system based on FPGA[J]. Petroleum Instruments, 2013, 27(2): 1-3. (in Chinese)
- [ 2 ] 孙元杰, 周士贵, 宋磊. 基于 dsp 的多通道数据采集系统的设计[J]. 软件, 2020, 41(10): 105-108.  
SUN Yuanjie, ZHOU Shigui, SONG Lei. Design of multi channel data acquisition system based on DSP [J]. Software, 2020, 41(10): 105-108. (in Chinese)
- [ 3 ] 谢旭良. 基于 DSP 和 FPGA 的多通道水声信号采集[J]. 网络新媒体技术, 2016, 5(4): 30-35.  
XIE Xuliang. Multi-channel underwater acoustic signal acquisition based on DSP and FPGA [J]. Journal of Network New Media, 2016, 5 (4) : 30-35. (in Chinese)
- [ 4 ] XIA H P, SU X Y, LIU P Z. Mosaic line-scan camera based on FPGA [J]. Journal of Measurement Science and Instrumentation, 2014, 5(4): 57-61.
- [ 5 ] 于克泳, 叶健. 利用 AD7616 的 V 型采样实现准同步数据采集[J]. 电子产品世界, 2017, 24(10): 74-78.  
YU Keyong, YE Jian. Achieving Pseudo-simultaneous sampling by "V-mode configuration" in AD7616 applications [J]. Electronic Engineering & Product World, 2017, 24(10): 74-78. (in Chinese)
- [ 6 ] 曹尚斌, 韩建宁. 基于 Zynq 的 16 通道高精度数据采集系统[J]. 机械与电子, 2022, 40(7): 13-16.  
CAO Shangbin, HAN Jianning. Sixteen-channel high-precision data acquisition system based on zynq [J]. Machinery & Electronics, 2022, 40 (7) : 13-16. (in Chinese)
- [ 7 ] 黄皎英, 赵如豪. 基于 FPGA 的 DDR3 SDRAM 控制器设计[J]. 现代电子技术, 2022, 45(22): 68-74.  
HUANG Jiaoying, ZHAO Ruhao. Design of DDR3 controller based on FPGA [J]. Modern Electronics Technique, 2022, 45(22): 68-74. (in Chinese)
- [ 8 ] 朱紫萌, 于洵, 王刚, 等. 一种多源多通道信号采集系统设计[J]. 电子设计工程, 2022, 30(2): 126-132.  
ZHU Zimeng, YU Xun, WANG Gang, et al. Design of a multi-source and multi-channel signal acquisition system [J]. Electronic Design Engineering, 2022, 30 (2) : 126-132. (in Chinese)
- [ 9 ] 梁宽宽, 刘敏. 基于 FPGA 的多通道红外信号采集系统设计[J]. 工业仪表与自动化装置, 2023, 289(1): 21-25.  
LIANG Kuankuan, LIU Min. Design of multi-channel infrared signal acquisition system based on FPGA [J]. Industrial Instrumentation & Automation, 2023, 289 (1) : 21-25. (in Chinese)
- [10] 孙甜, 张硕, 庞存锁. 多路超声信号采集与传输系统设计[J]. 火控雷达技术, 2021, 50(4): 49-54.  
SUN Tian, ZHANG Shuo, PANG Cunsuo. Design of multi-channel ultrasonic signal acquisition and transmission system [J]. Fire Control Radar Technology, 2021, 50(4): 49-54. (in Chinese)