

文章编号:1007-2780(2018)09-0772-06

基于 FPGA 的 PCI 总线红外图像采集系统设计

夏润秋*, 刘 洋¹

(北京信息科技大学 仪器科学与光电工程学院, 北京, 100192)

摘要:为了满足特殊视数据格式的红外成像设备图像采集与测试的相关需求,开发了一套低成本 PCI 总线图像采集系统。该系统采用现场可编程门阵列(FPGA)芯片作为主控芯片,实现信号接收、数据处理,之后通过 PCI9054 将数据传送到系统上位机,上位机根据通信协议识别图像数据帧头与帧尾所在位置,并完成图像的重建与显示。实验测试结果表明,系统能够稳定实时采集 100 fps 的 16 bit 深度 128×128 的红外图像,满足对自定义差分输入视频信号开展实时图像采集、存储与显示的设计使用要求。

关键词: FPGA; PCI9054; 图像采集; PCI 总线

中图分类号: TP274.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/YJYXS20183309.0772

Design and implementation of PCI bus infrared image acquisition system based on FPGA

XIA Run-qiū*, LIU Yang¹

(College of Instrumentation Science & photoelectric Engineering,
Beijing Information Science & Technology University*, Beijing 100192, China)

Abstract: In order to meet the requirement of image acquisition and testing of infrared imaging equipment with special data format, a PCI bus image Acquisition system was developed. The Field-programmable Gate Array (FPGA) chip is used as the main controller to realize signal acquiring and data processing, and PCI9054 is used to translate the data to the host computer of the system. The host computer identifies the head and tail of frame data according to the communication protocol, reconstructs and displays the image. The experiment results show that when the resolution of image is 128×128, pixel grayscale depth is 16 bit, the system can acquire the infrared image with the speed 100 fps stably, and the design satisfies the requirement of using.

Key words: FPGA; PCI9054; image acquisition; PCI bus

1 引 言

PCI(Peripheral Component Interconnect)是

由 Intel 公司推出的一种局部并行总线标准,自推出以来其在工业控制、网络通信、数据采集等行业得到了广泛的应用。目前在 PCI 技术的基础上已经发展出 PCI-E、CPCI、PXI 等更新改进版本接

收稿日期:2018-07-16;修订日期:2018-08-11.

* 通信联系人, E-mail: xrq@bistu.edu.cn

口,其中PCI、CPCI与PXI的总线规格基本相同,且被普遍运用于工业控制、测量仪器行业。^[1-3]

由于PCI总线带宽较高,且适用于个人计算机平台,使用便捷,因此其在视频图像数据采集、数据传输领域得到了非常广泛的应用^[4-5]。Matrox公司、国内的嘉恒图像等公司均有丰富的基于PCI或PCI-E的图像采集卡产品线。常用的图像采集卡只能应用于通用接口的图像视频信号采集,如Cameralink、GigE、USB等等;对于特殊视频格式的图像采集需求,可以自行设计专用卡或者选用NI公司的可编程多功能DAQ板卡,该板卡需要配合PXI总线计算机、Labview软件以及相关模块使用^[6-8]。但上述货架产品使用成本较高,图像采集卡的应用可拓展性也较差。本文针对一种16 bit数据深度LVDS输出的红外热成像系统的图像采集需求,设计了一种基于FPGA与PLX公司的PCI协议转换芯片PCI9054的低成本图像采集系统,实现了对成像数据的实时采集与显示,本系统也可扩展应用于其他数据采集场景。

2 系统设计

本系统需要采集的图像源为红外热图像,其图像信号中每个像素只包含表征红外辐射强度的16 bit深度灰度信号以及用于信号同步的时钟信号。热成像机芯通过三路LVDS接口输出上述视频图像信号,其中两路分别为图像像素的高八位与低八位数据,第三路为像素同步时钟。图像采集系统结构如图1所示,主要由图像采集板卡和上位机图像采集软件两部分组成。图像采集卡硬件部分设计采用了Altera公司的cyclone系列FPGA作为控制核心,用于对多路差分信号的采集与处理以及对PCI9054芯片接口的控制;PCI9054芯片作为板卡与计算机PCI总线的通信接口,实现FPGA与计算机的数据交互。

系统的工作流程为:热像仪通过两路LVDS串行接口分别输出16 bit深度灰度图像数据的高八位与低八位,差分信号经过LVDS信号接口后分别进入FPGA中的两个双口RAM(DP_RAM),由输入的数据同步时钟作为基准,实现串行数据到8 bit数据的转换;后经过数据处理模块讲两组数据合并为16 bit,并将两个相连元素的

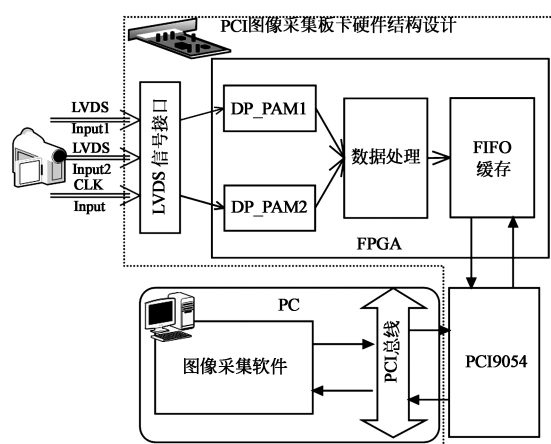


图1 系统结构原理图

Fig.1 Block diagram of image acquisition system

数据合并为32 bit数据存入FIFO中;之后,通过PCI9054将数据传输至上位机;最后,上位机通过图像采集软件读出数据,查找数据中图像的起始终止地址提取并显示图像。

3 图像采集板卡硬件电路设计

图像采集板卡的硬件部分主要由PCI总线接口、PCI9054、Altera公司Cyclone系列FPGA、EEPROM、差分转单端芯片DS90LV048以及时钟晶振组成。各硬件组成间的信号关系如图2所示。

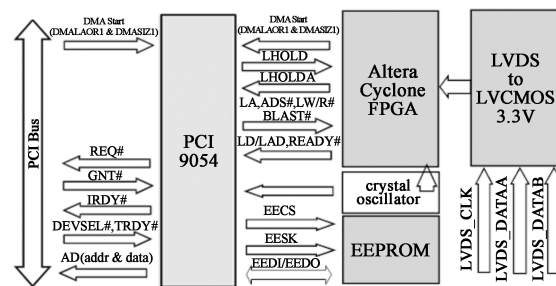


图2 图像采集板卡硬件信号连接原理图

Fig.2 Schematic diagram image acquisition board

由于PCI9054需要根据EEPROM配置信息初始化内部寄存器,因此需要预先配置好EEPROM。根据PLX给出的芯片选型推荐表,设计中采用了HT93LC56作为PCI9054配套的EEPROM。PCI9054一共有5种寄存器实现本地总线到内存的映射,Space0映射到Memory,Space1映射到I/O空间,总线位宽为32 bit,突发模式使

能;Run Time 寄存器用于使能 PCI 的中断与本地中断。图 3 所示为本设计采用的 EEPROM 配置信息。

Local Configuration Register							
Space 0 Range	(14)	FFFE0000	→	VPD Boundary/Endian Desc	(20)	00305524	→
Space 0 Remap	(18)	20000001		Direct Master → PCI Range	(30)	FF000000	
Expansion ROM Range	(24)	00000000		Direct Master Memory Local Base Addr	(34)	40000000	
Expansion ROM Remap	(28)	00000010		Direct Master I/O Local Base Addr	(38)	50000000	
Space 0/Exp ROM Descriptor	(2C)	8B430043	→	Direct Master → PCI Memory Remap	(3C)	00000003	→
Space 1 Range	(48)	FFFE0000	→	Direct Master → PCI I/O PCI Configuration	(40)	00000000	→
Space 1 Remap	(4C)	20000001		Mailbox 0	(0C)	00000000	
Space 1 Descriptor	(50)	00000143	→	Mailbox 1	(10)	00000000	
Mode/DMA Arbitration	(1C)	0101000C	→	PCI Arbitrator Control	(58)		

图 3 EEPROM 配置信息

Fig.3 Configuration information of EEPROM

4 软件设计

系统软件由图像采集板卡软件与上位机软件两部分组成。其中,采集板卡的嵌入式软件主要负责输入数据的解析、缓冲以及与上位机 PCI 总线交互等功能;上位机软件主要用于在响应 PCI 总线的 LocalToPci 中断信号时,采集板卡上缓存的图像数据,提取单帧完整图像数据并显示。

4.1 PCI 图像采集板卡软件

图像采集板卡的软件基于 Verilog 语言编写,其构成及工作流程原理如图 4 所示。视频信号的高低八位数据首先进入信号解析接收模块。视频信号中通过长度 10 Byte 的数据表示图像帧头,其值为 FFFFFFFF00FF00FF00,由于采用高低位分别发送,在信号解析模块中对两路数据分别设置了长度 40 bit 的缓冲,因此当高低 8 位数据缓冲同时分别为 FFFFFFFF 与 FFFF000000 时,即表示收到了图像帧头,并以此时间点同步图像数据用于控制数据读写。该模块控制向两组双口 RAM 写入图像数据,在根据数据同步信号判断出写完一个图像数据且 RAM 已满时产生 RAM 读使能信号通知数据控制模块读取数据。双口 RAM 的写数据位宽为 1 bit,读数据位宽为 8 bit;RAM 的存储空间在逻辑上分为两块。信号解析接收模块产生 RAM 写使能信号,使能信号驱动 RAM 读地址低位递增,当地址到达存储空间末尾时,将写地址最高位反转,从而实现 RAM 中两块存储空间的转换。为了实现乒乓操作,在 RAM 的其中一个存储空间满时,信号解析接收模块通过一个 RAM 可读的同步触发信号通知数据控制模块启动该存储空间的读过程,

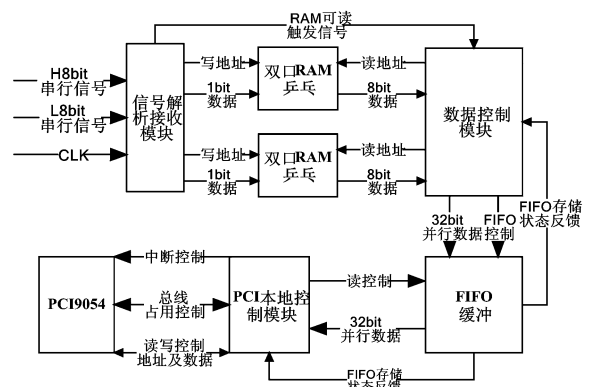


图 4 图像采集板卡板上软件结构原理图

Fig.4 Diagram of software structure in image acquisition board

同时启动另一个存储空间的写过程,依次循环。

数据控制模块的在收到 RAM 可读同步触发信号后,启动 RAM 的读过程,其读过程逻辑与信号解析接收模块的写过程基本相似。该模块产生两个双口 RAM 的读使能信号,使能信号驱动读地址低位递增,当地址到达存储空间末尾时,将读地址最高位反转,并等待信号解析接收模块产生新的 RAM 可读同步触发信号开始新的读过程。在数据读出过程中,需要缓存两个连续像元数据以合并成一组 32 bit 数据。

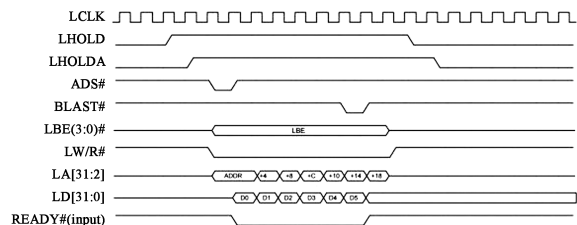


图 5 PCI 本地控制模块时序

Fig.5 Timing of PCI Local Control Module

PCI 本地控制模块用于读取 FIFO 数据,并与 PCI9054 通信。PCI 数据采集卡工作在 C 模式下的 SLAVE DMA 数据传输模式。如图 5 所示,PCI 本地控制模块的工作流程为:上位机通过 PCI9054 发起本地总线占用请求信号 LHOLD, FPGA 中的本地 PCI 总线控制器产生应答信号 LHOLDA,同意该请求;当主设备获得该信号后,发起 DMA 传输操作起始信号 ADS#,并提供本地总线读写方向信号 LW/R# 和地址信号 LA [31:2];FPGA 获得该起始信号后,发出总线准备好信号 READY#,并执行相应数据读取操作;此

时地址 LA 会根据 LBE 字节使能的设备每个读写周期递增一次;上位机完成 DMA 传输后,发起操作结束信号 BLAST #,本地 PCI 控制器捕获该信号后,改变 READY # 状态;上位机探测到 READY # 状态改变后,设置本地总线占用信号 LHOLD^[9]为 0,结束本次 DMA 操作。在上述工作过程中,为了能使上位机能够及时读取 FIFO 中的数据,PCI 本地控制模块在检测到 FIFO 中的数据存储量到达一定值时,会产生一个 LINT 中断信号触发 PCI 总线中断,当上位机检测到该中断时立即启动新的 DMA 传输过程读取数据。

4.2 上位机软件设计

根据 4.1 中所述,图像采集板上数据同步信号只是用于确定单个像素数据的读写完成时刻点控制 RAM 读写,通过 PCI9054 向上位机传输的数据为连续数据,不能够直接区分每帧图像的起始位置,因此需要在向上位机传输的图像数据中保留帧头标志位,同时为了便于实现实时完整地采集单帧图像数据,上位机软件的数据缓冲采用了如图 6 所示结构。该数据缓冲区的大小为两帧图像数据之和(包含帧头标志位),其工作流程如图 7 所示,工作过程中软件通过 DMA 每读取完一帧图像大小的数据量,write_flag 取反,若 write_flag 为 1 则 DMA 写入 data_bufferA 中,若为 0 则写入 data_bufferB 中,写入数据后软件检测帧头起始位并保存,并按照单帧数据长度读出图像。

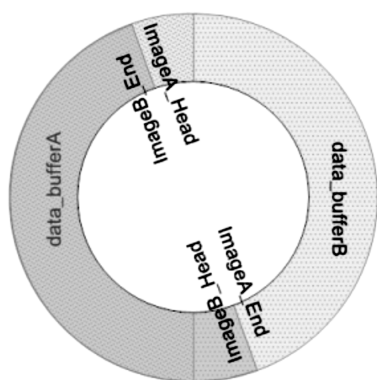


图 6 上位机软件数据缓冲结构

Fig. 6 Data buffering structure of host computer software

为了确保上位机软件能够及时地响应图像数据采集板卡触发的 PCI 总线中断,软件需要配置

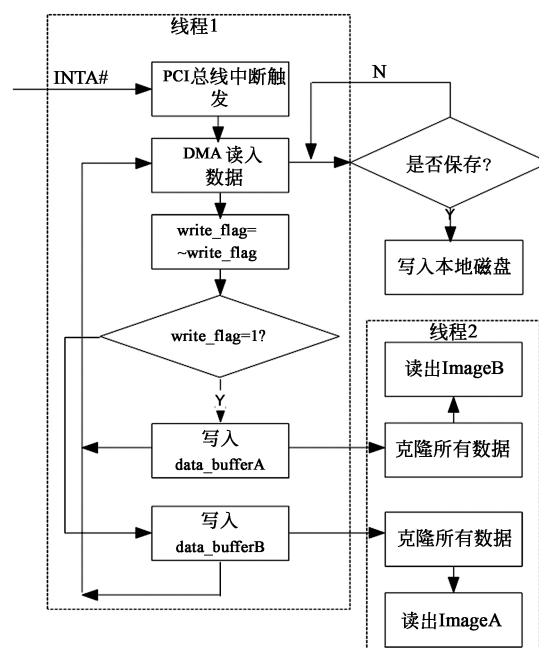


图 7 图像数据读出流程

Fig.7 Readout process of image data

好中断使能变量,使得上位机能够及时响应不同的中断信号^[10],在空闲状态下,软件需要等待本地 PCI 总线中断,判断当前是否可以读取数据;软件获取总线中断读取完数据后,要产生 DMA 传输完成中断确定本次 DMA 传输完成。要实现该功能首先要定义中断通知以及 DMA、PCI 本地中断使能变量:

```
LX_NOTIFY_OBJECT NotifyObject;
PLX_INTERRUPT PlxInterrupt;
PLX_INTERRUPT LocInterrupt;
//定义 PLX API 函数状态反馈值
PLX_STATUS rc;
当需要等待本地中断时,需要采用如下配置:
memset (&PlxInterrupt, 0, sizeof (PLX_INTERRUPT));
//使能本地中断标志位
LocInterrupt.LocalToPci = 1;
LocInterrupt.PciMain = 1;
//使能本地中断
PlxPci _ InterruptEnable ( &Device,
&PlxInterrupt);
PlxPci _ NotificationRegisterFor ( &Device,
& LocInterrupt, & NotifyObject);
PlxPci _ NotificationWait ( &Device, & No-
```

```

tifObject, PLX_TIMEOUT_INFINITE);
    PlxPci_NotificationStatus (&Device, &
NotifyObject, & LocInterrupt);
    if(LocInterrupt.LocalToPci)
    {
        //使能 DMA 传输完成中断,判断传输是否
        完成
        PlxPci_InterruptDisable (&Device, & Lo-
cInterrupt);
        memset(&PlxInterrupt, 0, sizeof(PLX_IN-
TERRUPT));
        PlxInterrupt.DmaDone = 1;
        PlxPci_InterruptEnable (&Device,
&PlxInterrupt);
        PlxPci_DmaTransferUserBuffer (&Device,
0, &DmaParams, PLX_TIMEOUT_INFI-
NITE);
        rc = PlxPci_NotificationWait (&Device,
&NotifyObject, 10);
        if (PlxInterrupt.DmaDone)
        {
            //此处将数据写入缓存中用于处理与显示,
            同时将数据写入本地文件
        }
    }
}

```

在上述程序中,等待到本地中断后,若想启动 DMA 传输完成中断,必须要调用 API 中的函数 PlxPci_InterruptDisable 禁用原先的本地中断,禁用后,应重新配置希望使用的其他中断标志位,如上文代码示例中调用 PlxInterrupt.DmaDone = 1 使得系统能够等待到 DMA 传输数据完毕的中断。若程序中不及时地清除原有中断,并且重新配置所需要的中断标志位,将等待不到需要的中断信号,从而导致程序无法正常运行。

5 实验测试

图 8 所示为通过 Modelsim 仿真的 FPAG 中的主要数据与时钟的工作时序,基于差分输入时钟信号 lvds_clk,数据控制模块将差分输入信号高八位数据 lvds_dataA 与低八位数据 lvds_dataB 通过两个双口 RAM 整合为一个像元数据 pixel_data(高 8 位在后,低 8 位在前),通过缓冲

将两个相邻像元的数据打包为一个 32bit 数据 fifo_data_in 发送给 FIFO, FIFO 写入时钟为数据同步信号的半频。上位机根据程序设定通过 fifo_rd_en 控制每次读取一定长度的数据,由于 PCI 总线位宽为 32bit,且时钟频率相对较高,上位机能够在较短时间内完成一次 DMA 传输,等待 FIFO 数据重新完成填充后再次进行数据读取。

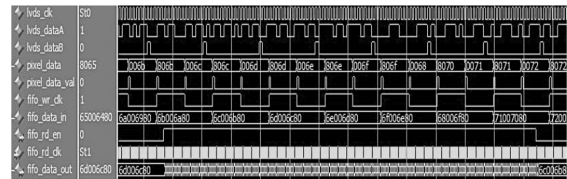


图 8 主要数据的读写时序

Fig.8 Reading and writing timing of main data

上位机图像采集软件基于 MFC 与 PCI9054 SDK(v7.25)开发,并通过 opencv 实时压缩 16 bit 灰度至 8 bit 并显示。软件界面如图 9 所示,图中显示为测试图像。实验中,采用了帧速 100 fps、图像深度 16 bit、分辨率 128×128 的模拟红外图像输入。

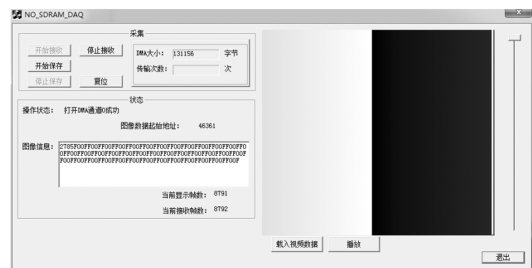


图 9 上位机图像采集软件界面

Fig.9 Interface of image acquisition software

实验表明软件能够实时显示红外图像,并能够实时将所接收到的所有数据存储于本地磁盘,系统设计满足使用指标要求。

6 结 论

本文采用了 PCI9054 芯片, FPGA 通过对本地总控制即实现了对外部输入数据的采集与 PCI 总线的传输;详细阐述了系统中板上程序与上位机程序的结构框架、工作流程以及设计要点。实现表明,通过 DMA 方式,该系统能够实现对

100 fps 帧频的 16 bit 红外图像的实时采集与显示。通过提高主时钟频率,增加差分信号输入接

口,系统能够进一步提高数据带宽并用于其他数据采集场景,具有较好的扩展性。

参 考 文 献:

- [1] 张丹红,张孝勇,刘文.基于 PCI9054 的数据通信接口卡设计[J].武汉理工大学学报(信息与管理工程版),2013,35(3):305-308,312.
ZHANG D H, ZHANG X Y, LIU W. Design on data communication interface card based on PCI9054 [J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Information & Management Engineering)*, 2013, 35(3): 305-308, 312. (in Chinese)
- [2] 颜建峰,吴宁.基于 PCI 总线的 DMA 高速数据传输系统[J].电子科技大学学报,2007,36(5):858-861.
YAN J F, WU N. High speed DMA data transfer system based on PCI bus [J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2007, 36(5): 858-861. (in Chinese)
- [3] 付宁,徐东东,杨易,等.基于 PCI9054 的 PCI 主模式板卡的设计[J].电子测量技术,2016,39(1):93-98.
FU N, XU D D, YANG Y, *et al.* The design of board worked in Initiator mode of PCI bus based on PCI9054 [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2016, 39(1): 93-98. (in Chinese)
- [4] 朴永杰,徐伟,王绍举.基于复合自动曝光算法的箭载视频采集系统设计[J].光学精密工程,2013,21(增):152-158.
PIAO Y J, XU W, WANG S J. Design of video observation system for launch vehicle based on compound auto-exposure algorithm [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(Supp.): 152-158. (in Chinese)
- [5] 穆欣,胡君,宋启昌,等.空间相机集成测试系统的时钟同步[J].光学精密工程,2010,18(6):1436-1443.
MU X, HU J, SONG Q C, *et al.* Time synchronization of integrated testing system of space camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(6): 1436-1443. (in Chinese)
- [6] 杨兆龙,陈云善,伞晓刚,等.用于四象限探测器光斑位置检测的数据采集传输系统设计[J].液晶与显示,2016,31(1):80-86.
YANG Z L, CHEN Y S, SAN X G, *et al.* Design of data acquisition and transmission system for quadrant detector detecting spot position [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2016, 31(1): 80-86. (in Chinese)
- [7] ZHANG H, XIAO B J, LUO Z P, *et al.* High-speed visible image acquisition and processing system for plasma shape and position control of EAST Tokamak [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2018, 46(5): 1312-1317.
- [8] 马建国,张禹,刘纪洲.图像采集系统中 LVDS 信号交流耦合传输设计[J].激光与红外,2016,46(11):1404-1407.
MA J G, ZHANG Y, LIU J Z. Design of LVDS AC coupling data transmission in image collection system [J]. *Laser & Infrared*, 2016, 46(11): 1404-1407. (in Chinese)
- [9] PLX Technology, Inc. PCI 9054 Data Book Version 2.1 [R]. USA: PLX Technology Inc., 2000: 5-68.
- [10] PLX SDK User Manual Version 7.20 [R]. USA: PLX Technology Inc., 2014: 5-72.

作者简介:夏润秋(1986—),男,江苏泰州人,博士,讲师,2015 年于北京理工大学获得博士学位,现为北京信息科技大学仪器科学与光电工程学院讲师,主要从事红外成像、光电对抗等领域的研究。E-mail: xrq@bistu.edu.cn