

文章编号:1007-2780(2014)03-0383-06

嵌入式千兆网高清视频传输系统设计

赵文达^{1,2*}, 赵建¹, 曲锋¹, 续志军¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:针对高清视频信号的数据量大,所需的传输带宽高的问题,设计了嵌入式千兆网高清视频传输系统。该系统选用 Altera 公司 Cyclone II 系列的 FPGA 芯片为主控制器,完成数据的采集、处理和传输控制。系统采集端选用 Camera Link 接口,其数据传输速率最高可达 1 Gbit/s,可为高清相机提供简单、灵活的连接。数据传输方式上采用千兆以太网技术,使视频信号不经压缩即可高速远程传输。实验采用分辨率为 1 392 列×1 040 行×8 位,帧频为 16 Hz 的紫外相机,结果表明,该系统每秒最高可传输 52 帧图像数据,数据流速度达到 607.8 Mbit/s,且成本低、体积小、功耗低、性能稳定,满足了工程需要。

关键词:嵌入式;千兆网;视频传输;FPGA

中图分类号:TP391 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20142903.0383

Design of embedded gigabit ethernet system for transmission of HD video

ZHAO Wen-da^{1,2*}, ZHAO Jian¹, QU Feng¹, XU Zhi-jun¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: To the problem of large amount of high-definition video signal and the required transmission bandwidth, the embedded Gigabit Ethernet high-definition video transmission system is designed. The system selects Altera Cyclone II family FPGA chip as main controller, completing control of data acquisition, transfer and data processing control. System acquisition end selects the Camera Link interface, which data transfer rate up to 1 Gbit/s, and can provide a simple, flexible connection for high-definition camera. The data transmission mode selects Gigabit Ethernet technology, so that the video data can be transferred without any compression in high speed. The experiment uses a resolution of 1 392×1 040×8 bit, a frame rate of 16 Hz ultraviolet camera. The results show that the system can be transmitted to a maximum 52-frame image data per second, and the data flow velocity reaches 607.8 Mbit/s. The system has the characteristics of low cost, small size, low power consumption, stable performance, meeting most lossless video transmission system requirements.

Key words: embedded system; gigabit ethernet; video transmission; FPGA

收稿日期:2013-03-09;修订日期:2013-03-28.

基金项目:国家自然科学基金(No. 61137001)

* 通信联系人, E-mail: 798915565@qq.com

1 引言

随着科技的发展,人们对视频的清晰度要求越来越高,高清视频的传输需要较高的带宽。随着 CCD 等成像器件工艺的不断进步完善,相机不论帧频速度、分辨率还是动态范围和灵敏度都有了较大的提高,从而图像数据的传输也需要高的带宽。另一方面,短距离的数据传输已不能满足工程的需要,人们开始研究快速、高效的远距离数据传输。针对上述问题,本文设计了嵌入式千兆网高清视频传输系统^[1-4]。

目前常用的高清视频传输方法是:首先应用视频压缩编码来减小传输带宽;然后,采用计算机上的 10M/100M 以太网,将压缩视频传到另一端的计算机上;最后,在另一端计算机上将压缩视频解码并显示。此种方法可以较快地实现高清视频的远程传输,但系统复杂,成本高,使用不便。本文设计的系统将视频数据的采集、传输和处理集成在一起,这样整个系统集成度高、小巧、使用方便、成本低。在数据的高速远程传输方面,本设计采用千兆以太网技术。千兆以太网在原有百兆以太网的技术规范上改进得到的,它与 10M/100M 以太网兼容,使用方便。并且,它的数据传输最高可以达到 1 000 M/s 的带宽,可以满足高清视频数据对传输带宽的要求^[5-7]。

本文设计的系统采用 Camera Link 接口的紫外相机进行视频图像数据采集,在 FPGA 的控制下,经千兆以太网高速传输至上位机进行图像的缓存与显示。其中,网络协议的处理和千兆网底层驱动的设计是本系统实现的难点。

2 系统总体设计

该系统需满足以下需求:(1)传输图像的分辨率在 $720 \times 1\,020$ 以上,数据位宽为 8 位,图像最高帧频为 40 Hz;(2)支持 RJ45 接口的千兆以太网,采用 TCP/IP 网络传输协议;(3)视频图像数据采集接口支持 CameraLink 接口。根据以上系统需求,设计千兆网系统的组成如图 1 所示。

(1)Camera Link 相机数据采集:相机产生的

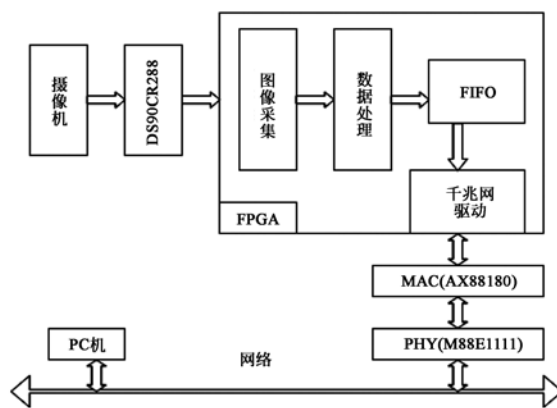


图 1 系统总体结构框图

Fig. 1 Overall structure of the system

标准 Camera Link 信号经过专用接收芯片 DS90CR288 解码成 LVTTTL 信号输入给 FPGA 内部的图像采集模块^[8]。图像采集模块根据行有效、数据有效等信号对有效的行和像素计数,将有用的像素数据传给数据处理模块。

(2)图像数据处理:数据处理模块参照像素时钟对图像数据进行串并转换处理,然后将转换后的并行数据缓存到 FIFO 中。

(3)数据传输的千兆网驱动:在 FPGA 的千兆网驱动中实现精简的 TCP/IP 协议和数据包的收发。媒体访问控制(MAC)层采用 AX88180 芯片,以太网物理层(PHY)采用 M88E1111 芯片。

其中,网络协议的处理和千兆网底层驱动的设计是本系统实现的重点也是难点,下面主要从这两方面介绍。

3 网络协议的处理

TCP/IP 协议(Transmission Control Protocol/Internet Protocol)即传输控制/网际协议,也被称为网络通讯协议。互联网中各主机进行通信使用的标准都是由它规定的^[9]。TCP/IP 是由应用层、运输层、网络层和数据链路层组成的。应用层是体系结构中的最高层,它直接为用户的应用进程提供服务。运输层主要包括传输控制 TCP 协议和用户数据报 UDP 协议,它负责向两个主机中进程之间的通信提供服务。网络层主要为不同主机在分组交换网上提供通信服务。IP 协议(网络协议)是 TCP/IP 在网络层上的主要协议。数据链路层将网络层数据组装成帧,并提供透明、

可靠的数据传送基本服务。

本文设计的视频图像传输系统的网络协议的处理由 FPGA 实现,考虑到效率与复杂性的问题,需要对 TCP/IP 协议进行相应的化简。本文设计的系统的网络协议特点为:(1)端对端通信环境。数据交换仅仅在采集前端和计算机之间进行,在这种情况下可以忽略因为网络堵塞、延时等导致数据丢失的可能性,因此系统不需要任何复杂的可靠性控制协议,使用 UDP 协议即可。(2)通讯双方信息固定。如 UDP 端口号、IP 地址和 MAC 地址等可以事先确定,不需要再实现相关的寻址协议。(3)数据格式固定。由于前端千兆以太网主要用来传输图像数据包,数据包格式及长度可以事前确定,并且采集前端从计算机接收命令数据包的数量及类型也都是固定的,直接丢弃相关的协议信息,仅根据数据就可以确定命令种类。这样对于数据采集前端来说,就可以把各层协议的首部事先准备好,发送时直接以常量形式封装在有效数据包前面,将封装后的数据包直接交给协议芯片发送,而不用再由系统实时计算产生。试验采用的各层协议格式^[10]如表 1 所示。

表 1 各层协议格式

Tab. 1 Levels of agreement format

以太网帧头 IEEE802.3	目标 MAC 地址	C8-60-11-1B-40-2C
	源 MAC 地址	00-11-22-33-44-55
	负载类型	0X0800
1P 包头 RFC791	版本、头长度、服务类型	0X4500
	1P 包长度	0X058E
	数据包标识	0X0000
	标志位、IP 碎片指针	0X0000
	存活期、负载协议	0X8011
	IP 包头校验	0XC0A8
	源 IP 地址	192.198.100.20
UDP 数据 报头 RFC 768	目的 IP 地址	192.168.100.22
	源端口	0000
	目的端口	1000
	UDP 数据报长度	0X057A
	UDP 校验	0X0000

4 千兆网驱动的设计

要通过千兆网以太网传输数据,至少需要实现开放系统互联模型(OSI)中物理层和数据链路层的功能。数据链路层主要承担数据帧的构建、传输控制、差错检查工作,物理层主要负责数据编解码、时钟基准、线路状态监测等工作。目前的以太网设计,常用的方法是将繁琐的以太网通讯协议编写在主控制器中,然后外连物理层接口芯片。以太网协议由软件实现较为复杂,不够稳定,并且不方便调试。为了简化设计系统的复杂度和节约成本,本设计选择了独立的数据链路层控制芯片 AX88180,对数据进行封装,并构建顶层传输控制协议^[11]。M88E111 作为千兆以太网物理层芯片,完成数据的信道编解码、传输时钟的生成以及控制码元在物理信道上的传输。

AX88180 是一款适用于千兆以太网的数据链路层(MAC)芯片,与主机通信采用 16/32 位的直接总线方式,1 000M 模式下支持全双工操作,兼容 IEEE802.3、802.3u、802.3ab 网络标准,支持 SRAM-LIKE 主机接口,可以非常方便地与 FPGA、ARM、DSP 等控制器连接。M88E111 是 MARVELL 公司推出的适用于 1000BASE-T 应用的千兆物理层芯片,它采用标准的 CMOS 工艺制造,支持 IEEE 802.3、IEEE 802.3u、IEEE 802.3ab 标准,向下兼容 10BASE-T、100BASE-T 应用,支持 GMII、RGMII、SGMII、TBI、RTBI 与 MAC 接口标准。FPGA、AX88180 与 M88E111 之间的连接电路如图 2 所示。

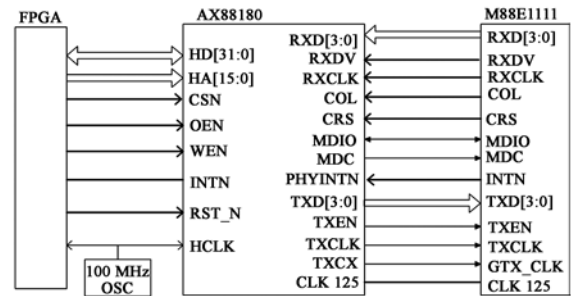


图 2 FPGA、AX88180 与 M88E111 之间连接电路图

Fig. 2 Connection circuit between the FPGA, AX88180 and M88E111

由于 FPGA 具有充足的管脚与 AX88180 连接,为了实现较高的数据传输速率,选择了 32 位的接口和异步操作的工作方式。AX88180 主机接口共包括 32 位数据总线 HD[31:0]、16 位地址总线 HA[15:0]、片选信号 CSN、读信号 OEN、写信号 WEN、中断信号 INTN、硬件复位信号 RST_N。AX88180 采用 RGMII(Reduced GMII)接口与 PHY 连接。RGMII 接口主要包括发送数据 TXD[0:3]、发送时钟 TXCX、发送使能 TX-EN、接收数据 RXD[0:3]、接收时钟 RXCX、接收使能 RXDV 以及冲突信号 COL 和传输感应信号 CRS、参考时钟信号 CLK125 以及 PHY 中断信号 PHYINTN 等。另外,AX88180 输入时钟与 FPGA 输入时钟由同一 100 MHz 晶振提供,AX88180 和 M88E1111 的复位信号都由 FPGA 控制,M88E1111 将 25 MHz 的时钟信号倍频成 125 MHz 时钟给 AX88180 提供发送参考时钟。

千兆网驱动的设计主要包括系统的初始化、数据包的接收发送和收发的仲裁。系统的初始化在系统上电时运行,主要工作是根据网络芯片说明手册对芯片寄存器进行适当的设置,使网络处于一个稳定的初始状态。设计中需要注意的是根据 M88E1111 数据手册的规定,M88E1111 硬件复位至少需要持续 15 ms 以上的复位时间,并且复位信号结束 5 ms 以后才能访问 PHY 寄存器。发送模块的主要工作是将数据从 FPGA 片内缓冲区中移出来,为其加上合适的协议首部后写入 AX88180 的内部发送缓冲区中,之后通过控制 AX88180 的发送寄存器将其通过千兆以太网发送出去。数据的发送是在 FPGA 中编程实现的,编程的技巧采用状态机的思想^[12]。发送过程是首先在原始状态等待,等到 FIFO 中缓存的图像数据大于一行时,将数据包头写入 AX88180 的发送缓冲区,包头写完后,FPGA 将 FIFO 中的一行图像数据写入 AX88180 的发送缓冲区,写完成后,配置与 AX88180 发送相关的寄存器,将一个完整的数据包通过 PHY 芯片 88EE1111 发送出去,发送结束进入到原始状态等待下一行新数据的发送。数据包的接收主要接收上位机发过来的命令,对于本系统仅包括开始采集、停止采集等。AX88180 接收到有效的数据包后,通过中断通知 FPGA。仲裁模块在数据发送空闲时检测并判断中断的状态,如果当前有效的是接收中断,总线就

会交给接收模块。上位机传输过来的数据帧包括相应的协议头,为了降低系统设计复杂度,设计中规定长度为 100 字节的数据帧为系统命令使用的帧长度,并且仅根据其中的 1 个字节判断命令种类,对于长度不等于 100 字节的数据帧直接做丢弃处理。

数据收发仲裁的作用是根据系统运行状态为系统初始化、发送数据、接收数据分配 FPGA 的总线使用权,避免因为数据混乱造成系统工作不正常,同时还捕获 MAC 的接收中断。工作流程如图 3 所示。

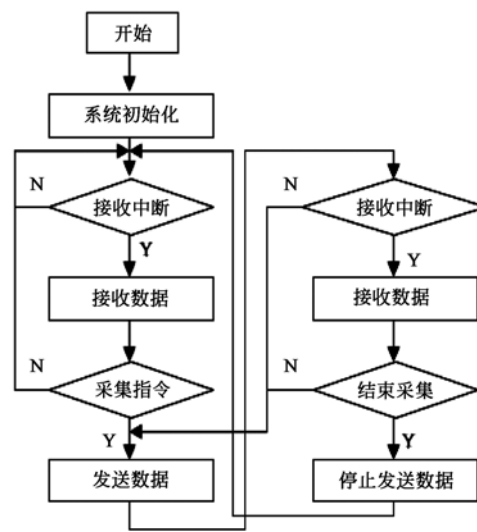


图 3 数据收发仲裁流程图

Fig. 3 Data transceiver arbitration flowchart

上电时,FPGA 先对系统初始化即总线被初始化占用,等到初始化完成后交出总线,等待 MAC 接收中断,中断有效时接收上位机发来的命令数据包,此时总线由接收模块占用。若命令发送数据,则发送模块占用总线将图像数据发送到上位机,发送间隔时期再判断 MAC 接收中断状态以判断是否存在接收数据,若有则接收模块要在发送间隔内将数据接收完毕,继续判断上位机命令,若为停止发送,则回到等待 MAC 中断状态,否则继续发送数据。

5 设计验证

实验采用分辨率为 $1\,392 \times 1\,040$,帧频为 16 Hz,8 位像素,像素时钟主频为 33.75 MHz 的紫外相机。由于发送模块发送数据的效率直接影响

数据的高速传输,本文做了数据发送过程的仿真,发送模块在 FPGA 中通过状态机编程实现,波形如图 4 所示(利用 Altera 的 SignalTapII 获得)。

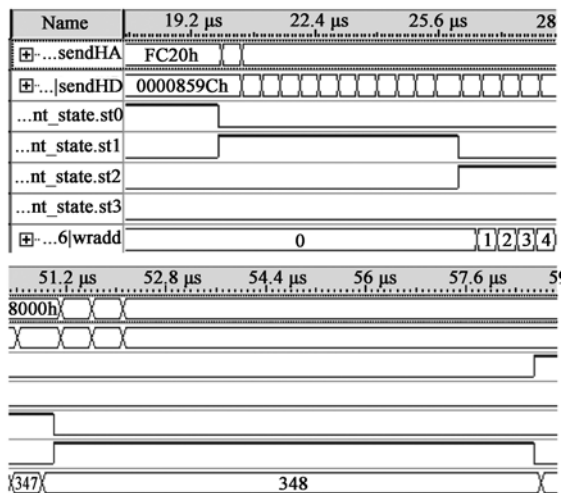


图 4 数据发送过程的仿真波形

Fig. 4 Simulation waveforms of data transmission process

为了完整地观察到发送数据过程中状态机的变化,将采集的两幅图拼接来看。sendHA 和 sendHD 分别代表 AX88180 的地址总线和数据总线, st0、st1、st2、st3 分别代表状态机中的等待、给数据添加包头、将数据写入 AX88180 的发送缓冲区、配置与发送有关的寄存器 4 个状态,高电平有效。wradd 表示发送一个网络数据包的图像数据数,在 st2 为高电平时,wradd 从 0 到 347 共 348 个 32 位宽的数据,即为 1 392 个 8 位宽的图像数据写入 AX88180 的发送缓冲区,正好为一行图像。

上位机测试程序用 VC++ 编写, start 表示开始采集图像, stop 表示停止采集图像。上位机测

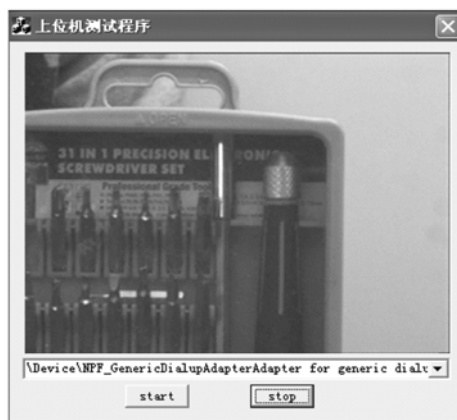


图 5 上位机测试程序效果图

Fig. 5 Computer test program effect diagram

试程序如图 5 所示。

可以看出图像存储完整,无丢失数据现象,并且测得系统可以稳定的工作在最高数据传输速度为 607.8 Mbit/s。

6 结 论

设计实现了无损视频高速传输的嵌入式千兆网系统。介绍了硬件电路的基本组成,重点介绍了网络协议的处理和千兆网底层驱动的设计,包括网络接口芯片的连接、数据包的接收发送和数据收发的仲裁。上位机采用 VC++ 6.0 编写的应用程序实现了网络通讯和高速网络数据流的实时存储与显示。最后在实验室完成了图像采集显示及传输速率的测试,最高传输速度达到 607.8 Mbit/s,与已有的千兆网系统数据传输速率为 300 Mbit/s^[4]相比,速率提高了一倍多,在实际应用中取得了良好效果。

参 考 文 献:

- [1] 罗通顶,李斌康,郭明安,等. 科学级 CCD 远程图像采集系统[J]. 光学精密工程, 2013, 21(2): 496-502.
Luo T D, Li B K, Guo M A, et al. Remote image acquisition system with scientific grade CCD [J]. Opt. Precision Eng., 2013, 21(2): 496-502. (in Chinese)
- [2] 李进,吕增明,陶宏江,等. 适于高速 CCD 图像数据光纤传输的纠错技术[J]. 光学精密工程, 2012, 20(11): 2548-2558.
Li J, Lv Z M, Tao H J, et al. Error correction technology for CCD image using high speed optical fiber transmission [J]. Opt. Precision Eng., 2012, 20(11): 2548-2558. (in Chinese)
- [3] 田园,任国强,吴钦章. 基于 SSD 硬盘的嵌入式高速图像存储技术[J]. 光电工程, 2009, 36(12): 138-142.

- Tian Y, Ren G Q, Wu Q Z. Embedded technology of high-speed image storage based on SSD [J]. *Opto Electronic Engineering*, 2009, 36(12): 138-142. (in Chinese)
- [4] 李艳霞. 千兆以太网接口高速图像采集系统设计[D]. 大连:大连理工大学, 2010.
Li Y X. High-speed image acquisition system based on gigabit ethernet interface [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010. (in Chinese)
- [5] 马建设, 李合银, 程雪岷, 等. 嵌入式自动聚焦摄像模组控制系统的设计[J]. 光学精密工程, 2012, 20(10): 2222-2228.
Ma J S, Li H Y, Cheng X M, *et al.* Control system for embedded auto-focusing camera module [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(10): 2222-2228. (in Chinese)
- [6] 樊光辉, 孙国强, 向健勇. 基于千兆以太网技术的大型实时传输系统[J]. 电子科技, 2009, 22(3): 37-40.
Fan G H, Sun G Q, Xiang J Y. Large-scale real-time transmission system based on gigabit ethernet technology [J]. *Electronic Sci. & Tech.*, 2009, 22(3): 37-40. (in Chinese)
- [7] 狄旭明. 远程高清视频采集系统设计[D]. 成都:成都理工大学, 2010.
Di X M. The design of remote HD video acquisition system [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2010. (in Chinese)
- [8] 吕耀文, 王建立, 曹景太, 等. 移动便携图像存储系统的设计[J]. 液晶与显示, 2012, 27(5): 697-702.
Lv Y W, Wang J L, Cao J T, *et al.* Design of portable image storage system [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2012, 27(5): 697-702. (in Chinese)
- [9] 谢喆. 基于 FPGA 的 TCP/IP 数据通信的设计与应用[D]. 武汉:武汉科技大学, 2011.
Xie Z. The design and implementation of TCP/IP communication based on FPGA [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2011. (in Chinese)
- [10] 马腾飞, 高世杰, 吴志勇. 基于千兆以太网的图像采集系统设计[J]. 微型机与应用, 2010(9): 72-74.
Ma T F, Gao S J, Wu Z Y. Synchronized frame acquisition system based on gigabit ethernet [J]. *Micro Computer and Application*, 2010(9): 72-74. (in Chinese)
- [11] 李爽, 郑喜凤, 严飞. 千兆以太网介质转换器在 LED 显示屏传输系统中的应用[J]. 液晶与显示, 2012, 27(1): 75-80.
Li S, Zheng X F, Yan F. Gigabit ethernet media converter used in LED display transmission system [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2012, 27(1): 75-80. (in Chinese)
- [12] 薛盼盼, 王晓东, 刘文光, 等. 空间遥感仪器便携式数据采集试验系统研究[J]. 液晶与显示, 2012, 27(2): 257-262.
Xue P P, Wang X D, Liu W G, *et al.* Portable data acquisition test system for space remote sensing instrument [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2012, 27(2): 257-262. (in Chinese)

作者简介: 赵文达(1987—), 男, 辽宁凌源人, 博士, 主要从事数字图像处理方面的研究。E-mail: 798915565@qq.com