

基于万兆以太网的 Cameralink 数字图像光纤传输系统

王 岩,张甫恺,张维达,邹 悦

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,吉林长春 130033)

摘要: 针对当前工业相机在传输高分辨率和高帧频图像时的传输困难问题,设计了以 FPGA 为核心处理器的 Cameralink 数字图像光纤传输系统。系统采用 SelectIO 接口模块代替接口芯片,经数据处理后再通过万兆以太网模块完成 2 Medium 模式的 Cameralink 图像数据与 AXI4-stream 数据流之间的相互转换。实验表明:对于 640×512 分辨率、1 kHz 帧频的 2 Medium 模式的 Cameralink 图像数据,可转化为 AXI4-stream 数据流进行高速、稳定的光纤传输。并在接收端将 AXI4-stream 数据流完整、实时地还原回 2 Medium 模式的 Cameralink 图像数据,解决了传输困难的问题,传输带宽为 3.93 Gbit/s。

关键词: Cameralink; 万兆以太网; 数字图像; 光纤传输

中图分类号: TN929

文献标识码: A

文章编号: 1002-1841(2022)06-0080-03

Optical Fiber Transmission System of Cameralink Digital Image Based on 10 Gigabit Ethernet

WANG Yan,ZHANG Fu-kai,ZHANG Wei-da,ZOU Yue

(Changchun Institute of Optics,Fine Mechanics and Physics,Chinese Academy of Sciences,Changchun 130033,China)

Abstract: Aiming at the difficulty of transmitting high-resolution and high frame rate images of industrial cameras,a Camera-link digital image optical fiber transmission system based on FPGA was designed.The system used SelectIO interface module to replace the interface chip.It completes the mutual conversion between Cameralink image data in 2 Medium mode and AXI4-stream data through data processing and 10 Gigabit Ethernet module.Experiments show that Cameralink image data in 2 Medium mode with 640×512 resolution and 1 kHz frame rate can be transformed into AXI4-stream data for high-speed and stable optical fiber transmission.At the receiving end,the AXI4-stream data is completely and real-time restored to the Cameralink image data in 2 Medium mode,which solves the problem of difficult transmission,and the transmission bandwidth is 3.93 Gbit/s.

Keywords: Cameralink; 10 Gigabit Ethernet; digital image; optical fiber transmission

0 引言

随着科学技术的迅速发展,人们对用于航天航空、雷达和通信等领域的图像传输需求越来越高。Cameralink 接口因具有实时性好、稳定性高、可用于高速传输等优点,现已成为工业相机应用最广泛的接口之一^[1]。该接口是由多家相机生产厂商和数码相机供应商联合制定的高速串口通信协议接口,采用低压差分信号(LVDS)进行传输,包含 11 对 LVDS 信号和 4 个电源信号。Cameralink 接口有 Base、Medium、Full 3 种工作模式^[2]。Base 模式使用 1 个连接器,通过端口 A-C 进行数据传输,最大传输速度为 2.0 Gbit/s。Medium 模式使用 2 个连接器,通过端口 A-E 进行数据传输,最大传输速度为 4.8 Gbit/s,如果使用 2 个相同的 Medium 接口,就可成为双 Medium 接口。Full 模

式使用 2 个连接器,通过端口 A-H 进行数据传输,最大传输速度可达 5.4 Gbit/s^[3]。

由于数字成像技术在帧频、带宽和分辨率等方面的要求越来越高,所产生的数字图像数据量也越来越大。因此,将大量的图像数据进行传输对传输通道有非常高的要求。万兆以太网作为新一代网络传输标准,仍然保留了以太网帧结构,可兼容当前已有的网络传输环境,很大程度上降低了开发成本^[4-5]。万兆以太网采用光纤代替网线来作为物理传输媒介,传输带宽提升至 10 Gbit/s,比千兆以太网提升了 10 倍,最长传输距离可达 40 km,可满足大量图像数据传输的需求^[6]。

1 系统设计

系统采用 Kintex-7 系列的 XC7k325T 芯片作为核心处理器,主要实现 Cameralink 接口电路、J30J 接口电路、万兆以太网接口等。Kintex-7 系列拥有超高的性价比,为高端功能提供了平衡优化的配置。该系列

基金项目: 吉林省科技发展计划项目(20190302086GX)

收稿日期: 2021-11-29

具有高性能的 10.3 Gbit/s 串行连接器、低成本优化的 6.5 Gbit/s 串行连接器及存储器,能支持大量 10G 光学有线通信设备和无线网络设备^[1]。系统设计框图如图 1 所示。数字图像由 SDR26 接口接入发送端 FPGA 板卡,经 FPGA 数据处理后转化为 AXI4-stream 数据流通过 SFP 光模块连接的光纤传输到接收端。接收端 FPGA 板卡将接收到的 AXI4-stream 数据流再转换为 Cameralink 协议的图像数据通过 SDR26 接口输出到 Dalsa 采集卡。

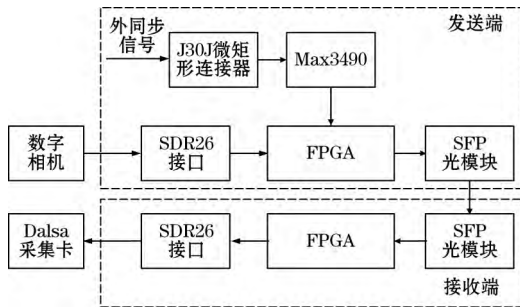


图1 系统设计框图

2 主要功能模块设计

2.1 Cameralink 图像接口模块

当采用 Cameralink 协议传输图像时,发送端相机会输出 4 对差分数据和 1 对时钟差分信号。根据协议需将这 5 对差分信号转化为 CMOS/TTL 信号,接收时再将 CMOS/TTL 信号转换为 LVDS 信号。传统的方法是在发送端采用 DS90CR286/288 芯片将 LVDS 信号转换为 CMOS/TTL 信号,在接收端采用 DS90CR285/287 芯片将 CMOS/TTL 信号转换为 LVDS 信号^[1]。采用芯片进行信号转换虽然比较方便,但是在设计电路板时需要考虑芯片的设计,在使用时若存在电磁干扰会影响信号的传输,甚至有时存在芯片损坏的情况,影响调试的进度。因此,为了方便开发者使用,Xilinx 公司提供了一个 SelectIO IP 核用于 Cameralink 协议发送和接收信号的相互转换。采用 SelectIO IP 核直接对信号进行转换,避免了因芯片带来的上述问题。使用 SelectIO IP 核作为 Cameralink 图像接口对图像数据进行处理的框图如图 2 所示。发送端的输入为 4 对 Cameralink 差分串行数据流、1 倍频 Cameralink 时钟和 7 倍频 Cameralink 时钟,在时钟作用下将 4 对串行数据按照解串比为 1:7 的比例转换为 28 位的并行 Cameralink 数据^[8-9]。接收端主要将 28 位的 Cameralink 数据在时钟作用下转换为 4 对 Cameralink 数据。

2.2 2 Meiudm 图像数据流处理模块

8×12 bit 的 2 Medium 图像模式每次传输的数据

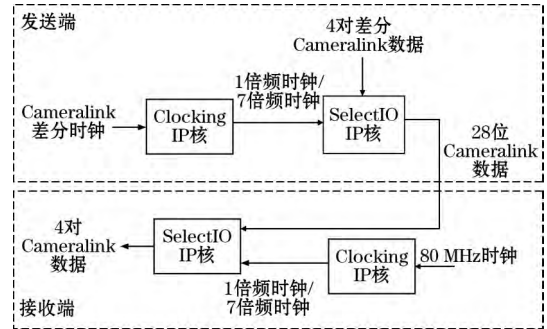


图2 Cameralink 图像接口框图

量为 96 bit,但是系统用于万兆以太网传输的 AXI4-stream 数据宽度为 64 bit。因此,需对 2 Medium 图像数据流进行处理。2 Medium 图像数据流处理框图如图 3 所示。

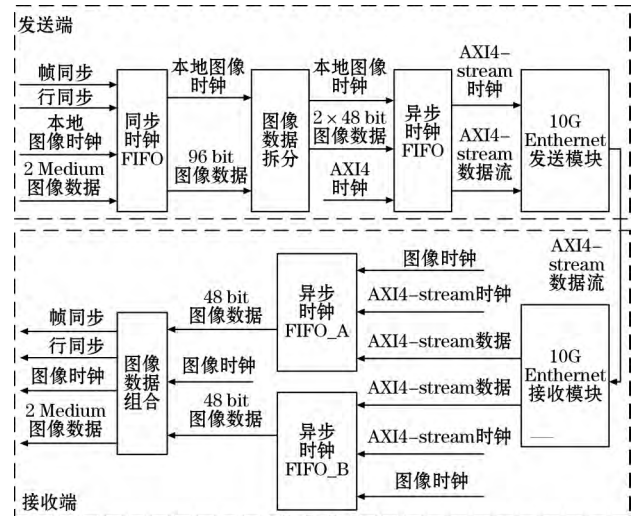


图3 2 Medium 图像数据流处理框图

在发送端首先使用一个同步时钟 FIFO 模块对图像数据进行缓存,随后将 96 bit 的 2 Medium 图像数据拆分成 2 个 48 bit 的图像数据,依次写入一个异步时钟 FIFO 模块。经过异步时钟 FIFO 模块后,时钟变为 AXI4-stream 数据流传输的时钟,读出的 48 bit 图像数据添加 16 bit 的 0 转换成 64 bit 的数据。最后将数据转换为 AXI4-stream 数据流送入 10G Ethernet 发送模块进行发送。在接收端首先使用 10G Ethernet 接收模块对 AXI4-stream 数据流进行接收。然后根据时钟节拍分别写入 2 个异步时钟 FIFO 模块,将 64 bit 的数据转换为 2 个 48 bit 的图像数据。最后将 2 个 48 bit 的图像数据组合成 96 bit 的 2 Medium 图像数据,进而转换成标准的 Cameralink 的图像数据格式。

2.3 万兆以太网光纤传输模块

万兆以太网光纤传输模块采用 AXI4-stream 总线协议,该协议的数据宽度为 32 位或 64 位。系统选用 64 位的数据宽度进行传输,其传输时序图如图 4 所

示。64 位 AXI4-stream 数据流的组成主要包括 tready (准备传输) 信号、tdata (数据)、tvalid (传输有效) 信号、tlast (传输结尾) 信号等。其中, tdata 数据头部需插入源地址和目的地址。当发送帧时, 需要将 tvalid 信号置高来表示数据有效周期, tlast 信号被置高一个时钟周期, 用于指示数据包的结束。当接收到有效数据时, tready 信号被置为有效。

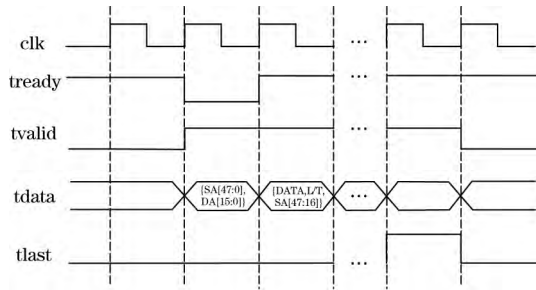


图 4 AXI4-stream 64 位传输时序图



图 5 FPGA 观测发送端时序图

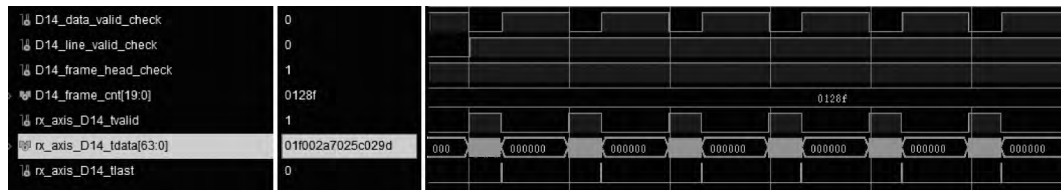
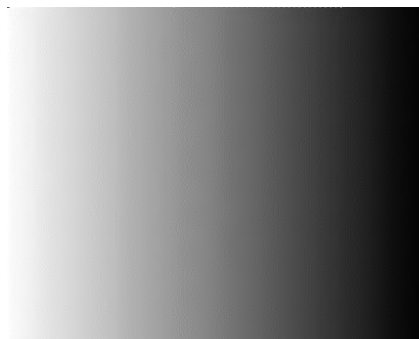


图 6 FPGA 观测接收端时序图



(a) 横向渐变测试图



(b) 纵向渐变测试图

图 7 接收端恢复的测试图像

3 实验验证

实验首先对图像的发送端和接收端进行时序验证。发送端使用红外相机进行图像传输, 相机帧频为 1 kHz, 分辨率为 640×512, 工作模式为 8×12 bit 的 2 Medium 模式, 数字图像的传输带宽为 3.93 Gbit/s。通过 FPGA 逻辑分析仪观测的发送端时序图如图 5 所示, 接收端时序图如图 6 所示。从图中可看出, 通过光纤传输的万兆以太网 AXI4-stream 数据流时序是正确的。

接收端接收到的测试图像如图 7 所示, 图 7(a) 为接收端恢复的横向渐变测试图, 图 7(b) 为接收端恢复的纵向渐变测试图。经验证, 系统工作稳定, 接收端还原的测试图像与发送端发送的图像数据完全一致。综上, 可证明经系统实时传输后的图像数据是稳定、可靠的。

4 结束语

系统采用万兆以太网对数字图像数据进行光纤传输, 减少了对接口芯片的使用, 解决了工业相机在传输高分辨率和高帧频图像时传输困难的问题。实验结果表明, 系统可将工业相机高帧频 2 Medium 模式的 Cameralink 图像数据转化为 AXI4-stream 数据流进行高速、稳定的光纤传输。

参考文献:

- [1] 吴琦, 薛海东, 刘召庆, 等. 高速 Cameralink 视频信号的光纤传输系统设计 [J]. 应用光学, 2018, 39(2): 284-289.
- [2] 张驰, 葛军, 李范鸣. 基于 Camera Link 的红外图像显示研究 [J]. 红外, 2015, 36(5): 12-15.
- [3] 隋延林, 何斌, 张立国, 等. 基于 FPGA 的超高速 Camera-Link 图像传输 [J]. 吉林大学学报: 工学版, 2017, 47(5): 1634-1643.

(下转第 87 页)

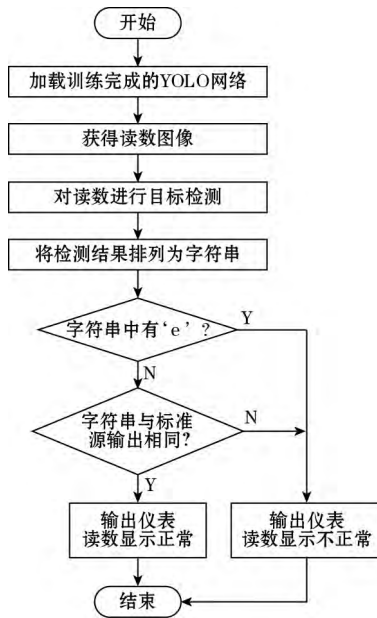


图 11 图像处理模块流程

将试验样本分为 3 类,并对每类样本进行编号,样本类别对应的名称和数量如表 1 所示。

表 1 样本名称、编号和数量关系

样本名称	类别编号	数量
字符显示不完整	1	245
字符显示完整但与标准源不同	2	321
合格仪表	3	986

对分类完成的样本进行线上测试,得到如表 2 所示的结果。

表 2 线上测试结果

样本	检出个数	正确率 / %	平均正确率 / %	耗时 / s	平均耗时 / s
1	238	97.14		1.567	
2	316	98.44	98.23	1.565	1.233
3	977	99.10		0.568	

检测正确率最高的为编号 3 的 99.10%,最低的为编号 1 的 97.14%,耗时最长为编号 1 的 1.567 s,耗时最短的为编号 3 的 0.568 s,平均正确率和平均耗时分

别为 98.23%和 1.233 s。说明设计的系统在仪表出厂检测效果的正确率和速度上具有实用意义,能够为工业仪表出厂检测方案设计提供借鉴。

6 结束语

本文研发了基于 STM32 的仪表出厂检测系统,将数字图像处理技术与嵌入式技术相结合,利用 FPGA 并行高速的特点,减少图像处理的时间。通过实验测试证明了系统的可行性。系统具有体积较小、成本较低、操作简单等优势。

参考文献:

- [1] 胡武林.智能仪表直读装置中的图像处理及识别算法研究 [J].哈尔滨: 哈尔滨工程大学,2018.
- [2] 刘超英.智能数显识别系统的研究与设计 [J].成都: 成都理工大学,2018.
- [3] 李皎,蒋朝平.浅谈数显与指针仪表示值识别技术的研究与应用 [J].建筑工程技术与设计,2017(19): 241.
- [4] 邓清勇,石晓龙.变电站室内数显仪表的读数识别 [J].工业仪表与自动化装置,2018(2): 88-91.
- [5] 张春洋,胡涛,乔治宏,等.液晶数显仪表的缺字自动识别 [J].光电工程,2012(12): 53-58.
- [6] 王锋,项导.基于卷积神经网络的数码仪表识别方法 [J].机械设计与制造,2018(9): 63-66.
- [7] 张鑫,张家洪,许晓平,等.计量检定实验室仪表读数自动识别系统设计 [J].电子测量技术,2021,44(1): 173-177.
- [8] 刘雄豪.基于机器视觉的仪表数字识别智能监控系统的设计与实现 [J].成都: 电子科技大学,2014.
- [9] 郑焱雄,赵立宏.基于 STM32F4 和 OV5640 尿液分析仪的图像采集系统设计 [J].科技风,2017(17): 74-75.
- [10] 刘芳,刘玉坤,林森,等.基于改进型 YOLO 的复杂环境下番瓜果实快速识别方法 [J].农业机械学报,2020,51(6): 229-237.
- [11] 李俊,袁亮,冉腾.基于 YOLOv4 的指针式仪表自动检测和读数方法研究 [J].机电工程,2021,38(7): 912-917.

作者简介: 金黎明(1977—),高级讲师,硕士,研究方向为机电一体化。E-mail: jinlm@gzslits.com.cn
丁家满(1976—),副教授,硕士,研究方向为数据挖掘。

(上接第 82 页)

- [1] 孔德伟,袁国顺,刘小强.基于 FPGA 的万兆以太网链路的设计与实现 [J].微电子学与计算机,2019,36(12): 21-25.
- [2] 吴惑,刘一清.基于 FPGA 的万兆以太网 TCP/IP 协议处理架构 [J].电子设计工程,2020,28(9): 81-87.
- [3] 徐光辉,聂永军,冯秀妍.基于 FPGA 的 10G 以太网传输设备设计 [J].光通信技术,2015,39(11): 4-6.
- [4] 张甫恺,崔明,张维达.基于 GTX 串行收发器的高速 Cam-eralink 数字图像光纤传输 [J].计算机测量与控制,2016,

24(6): 192-194.

- [5] 汝兴海,任勇峰,李辉景,等.基于 Camera Link 的高速图像传输模块及时序优化设计 [J].计算机测量与控制,2015,23(7): 2546-2548.
- [6] 张维达,崔明,张甫恺.基于异步 FIFO 的 Camera Link 数字图像光纤传输技术 [J].仪表技术与传感器,2016(7): 47-50.

作者简介: 王岩(1994—),硕士,主要从事光电通信技术方向的研究。E-mail: wy_ciomp@163.com
张甫恺(1989—),硕士,主要从事激光及光通讯技术方向的研究。E-mail: zfk_0765@163.com