

文章编号 1674-2915(2009)04-0352-06

# 基于 FPGA 的千兆以太网光纤转换器的设计

于洪涛<sup>1,2</sup>, 丁铁夫<sup>1</sup>, 郑喜凤<sup>1</sup>, 李爽<sup>1,2</sup>, 尹柱霞<sup>1,2</sup>

(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 研究生院, 北京 100039)

**摘要:**为了解决千兆以太网5类非屏蔽双绞线(1000BASE-T)最长传输距离为100 m的瓶颈问题,选用了传输距离较远的光纤取代原有的5类非屏蔽双绞线。考虑网络成本,不改变原有发送与接收系统结构,设计了一种千兆以太网光纤转换器。通过基于现场可编程门阵列(FPGA)的光纤端和千兆以太网端数据格式的转换及控制模块的设计,实现了以太网双绞线和光纤两种介质间的相互转换。将该转换器应用于高清晰度LED显示屏的实时数字视频传输系统中,取得了良好的效果,实现了距离可达10 km的实时数字视频传输,满足了未来一段时期内用户的需求,达到了设计的预期目标。

**关键词:**现场可编程门阵列;千兆以太网;光纤转换器

**中图分类号:**TN253 **文献标识码:**A

## Design of optical fiber converter of Gigabit Ethernet based on FPGA

YU Hong-tao<sup>1,2</sup>, DING Tie-fu<sup>1</sup>, ZHENG Xi-feng<sup>1</sup>, LI Shuang<sup>1,2</sup>, YIN Zhu-xia<sup>1,2</sup>(1. *Changchun Institute of Optic, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China* )

**Abstract:** In order to solve the problem that the longest transmission of 1000BASE-T is 100 meters, the optical fibers with longer transmission distances were selected to replace the five kinds of twisted pair lines (1000BASE-T) in Ethernet. In consideration of the network costs, a optical fiber converter of Gigabit Ethernet was presented by using the original structures of the sending and receiving systems, which could implement the conversion between the twisted pair lines and the optical fibers based on the conversion of data format and the design of control module on Field Programming Gate Array(FPGA). This converter was used for the real-time digital video transmission system of a high definition LED screen with reasonable effects, and it implements a real-time digital video transmission up to 10 km. The results prove that proposed optical fiber converter can meet the needs of users in a certain future, and can achieve the expected target of this design.

**Key words:** Field Programming Gate Array(FPGA); Gigabit Ethernet; optical fiber converter

## 1 引言

以太网技术是目前使用较为广泛的局域网技术,它具有技术先进、价格低廉和高度灵活等诸多优点,在实际应用的计算机网络中占有80%以上的份额。随着宽带技术的飞速发展,对大视频流和大型存储数据传输的要求进一步提高。90年代末期,以太网被进一步革新,其速率由100 Mb/s发展到了1 000 Mb/s。目前,千兆以太网已经发展成为主流网络技术,其传输介质标准共有4种类型<sup>[1]</sup>: 1000BASE-LX、1000BASE-SX、1000BASE-CX和1000BASE-T。其中,1000BASE-LX既可以使用单模光纤也可以使用多模光纤;1000BASE-SX只能使用多模光纤;1000BASE-CX使用的是铜缆;1000BASE-T使用的是非屏蔽双绞线。

1000BASE-T的最长传输距离为100 m,有时难以满足实际的远距离传输需求;而光纤传输距离远,且具有衰减小和不受电磁波干扰等优点,因此,选用传输距离较远的光纤取代原有的5类非屏蔽双绞线很有意义。考虑成本,本文在不

改变原有的系统设备的前提下,设计一种以太网光纤转换器,通过基于现场可编程门阵列(FPGA)的光纤端口和千兆以太网端数据格式的转换及控制模块设计,实现了千兆以太网非屏蔽双绞线和光纤两种介质间的相互转换。

## 2 系统总体设计方案

图1是千兆以太网光纤转换器结构图,该设计方案整体上由千兆以太网收发模块和光纤收发模块组成,FPGA作为主控制器分别对这两大部分进行控制并实现千兆以太网/光纤数据格式的转换。其中FPGA选用Altera公司的Cyclone II系列,该系列芯片内部资源丰富,性价比较高;选用的千兆以太网物理层芯片支持双端口独立收发,数据传输速率可达2 Gb/s;光纤物理层芯片TLK1221支持0.6 G至1.3 G的传输带宽,内部可实现串并/并串转换、锁相环、时钟恢复等功能;选用了最远传输距离可达10 km的光收发器。需要说明的是,本文中的“千兆以太网”均指基于非屏蔽双绞线(即1000BASE-T标准)这种传输介质的千兆以太网网络。

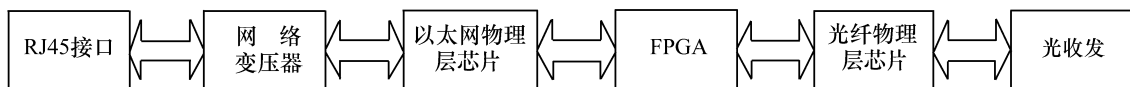


图1 千兆以太网光纤转换器结构框图

Fig. 1 Structure diagram of optical fiber converter of Gigabit Ethernet

## 3 系统各部分设计原理

### 3.1 千兆以太网收发模块

在该模块的实际设计中,主要工作围绕在对MAC层的设计。介质访问控制(Media Access

Control, MAC)是以太网设计的核心部分,位于OSI模型中的数据链路层<sup>[2]</sup>,主要实现帧发送、帧接收、MAC控制以及千兆介质无关接口管理等4大功能。对标准的千兆以太网帧结构稍做修改,取消了CRC校验位,增加了同步校验位,提高了系统设计的灵活性。图2给出了实用的千兆以太网帧结构。

前导码 Preamble	起始位 SFD	目的MAC 地址	源MAC 地址	长度/类型 Length	数据位 Data	填充位 IPG	校验位 SYN

图2 改进的千兆以太网帧结构

Fig. 2 Improved frame structure of Gigabit Ethernet

发送帧共包含 3 方面的内容,首先是发送实时数字视频信号,它在传输过程中占据主要时隙,并采用了 MAC 地址广播的传输方式,通知每帧视频数据泛洪传输到每个接收装置。然后是校正数据的在线更新,传输的时候采用单播方式,目的 MAC 地址选择的是需要更新校正数据的接收装置,接收端使用匹配 MAC 地址的方式决定是否对校正数据进行更新。最后是视频信号的在线监视,它利用了全双工的工作方式,在数据下行的同时,将需要监视的数据流回传至发送端。传输的开始与结束是通过发送端生成的控制帧和长度/类型字段来实现的。

在数字视频数据的传输过程中,标准以太网数据位长度要求控制在 1 500 byte 以内<sup>[3]</sup>,本文选用的千兆以太网物理层芯片可以支持较长帧的传输,而且根据视频帧的特点,LED 显示屏大多都是工作在 1 024 × 768 的分辨率下,而且每个像素点都有 24 Bit 的色深。本文对数据位长度进行了适当扩展,设定为 1 536 byte(512 Bit × 24 Bit),目的是方便接收端对接收到的数据进行还原和存储排列,简化设计的难度。对于校正数据的传输,由于接收设备每次更新需要接收的数据量为 256 Bit × 64 Bit × 24 Bit,使用这种帧格式也是比较便利的,而且在全双工的传输方式中不存在网络拥塞,较长的数据位也可以保证较高的实际带宽利用率。由于该转换器用于专用的封闭网络,并不需要和外界设备进行以太网格式的通信,所以这种非标准帧格式并不会影响到系统整体的运行和维护。

由于该转换器应用于实时显示系统,对于校验位,则不需要进行帧的重传,另外物理层极强的

纠错能力,误码率可以保证在  $10^{-10}$  量级。实际测试表明,在没有加入 CRC 校验时,实时显示效果并未受到影响。

这里对原 CRC 校验所占的 4 个字节重新进行了定义,将它放到了数据位之前。前面两个字节作为帧计数器,用于对一帧数据按行计数,便于对数据帧的恢复。后面两个字节是控制命令,协议共规定了 13 Bit 的命令,每帧里面都进行了传输,用于对显示屏效果进行调节,实现远程遥控功能。

图 3 是使用 Quartus II 软件对发送程序进行综合生成的状态机<sup>[4]</sup>,它真实地反映出了 Verilog HDL 语言程序内部逻辑状态跳转关系,共有 8 个状态,分别对应着实际应用中的以太网帧结构的各个部分的生成以及帧间隙。此状态机的驱动时钟是 125 M 的发送时钟,当对以太网进行复位时,会从任意一个状态进入帧间隙,否则就依次发送数据帧,同时使能信号置高。发送模块作为数据传输通道,经过千兆介质无关接口(Gigabit Media Independence Interface, GMII)直接与以太网物理层芯片进行连接。

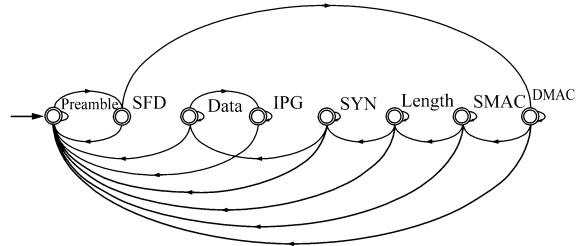


图 3 发送模块状态机

Fig. 3 State machine of sending module

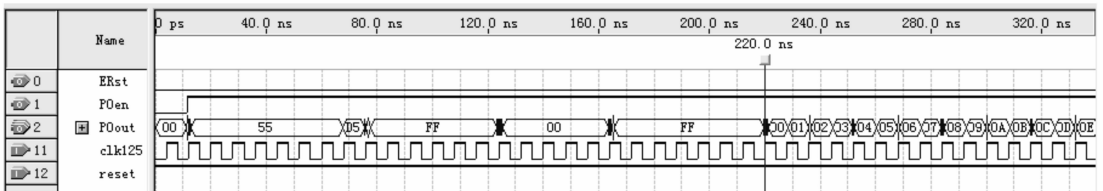


图 4 发送模块时序仿真波形

Fig. 4 Timing simulation result of sending module

图4是使用Quartus II软件进行时序仿真后的波形,POen是P0口使能信号,P0out是P0口8位以太网数据位,clk125为以太网125M的发送时钟,它符合GMII接口标准的格式。使能信号为高电平的周期为一个发送周期,数据位依次发送从前导码至数据位的全部帧字节,而数据沿需要和125M的以太网时钟对齐,保证了物理层可以正确处理信号,当使能信号为低电平时就进入了帧间隙。

总体看来,接收模块实现的功能是发送模块功能的逆过程,它可以接收来自发送模块的视频数据,将其缓冲到SDRAM的某块区域中,也可以判断接收并更新校正数据,缓冲到SDRAM另外一块区域中,还可以判断控制命令,用于对远程工作状态的监视。

在数据接收的整个过程中,由于命令帧中不存在数据,此时会通知本地发送模块,将数据流传输到源MAC地址所对应的模块,进行全双工的传输,并忽略填充位的信息。对于校正数据和视频数据,则会按照顺序依次接收,并按照格式将数据存储到指定位置上。在数据接收时,都会对接收

到的数据进行判断,如果出现了错误,如不符合协议规定的数值等,则会对整帧数据进行丢弃,接收状态机强制进入帧间隙状态。这时并不需要将错误信息回传到发送部分,因为人眼对实时视频显示中少量的错误信息并不敏感。

接收模块也是使用Verilog HDL语言编写状态机来实现的,使用的是One-Hot编码,每种状态对应的码元只有一个Bit为1。状态机与发送模块类似,此处不再赘述。

### 3.2 光纤收发模块

本设计方案选用单模光纤作为千兆以太网的传输介质,它支持全双工模式的数据传输,损耗系数小、传输距离远。802.3z与802.3ab协议相比,在数据链路层及以上各层没有变化,也是采用GMII接口作为MAC层与物理层之间的连接。

该模块的设计主要是围绕光纤物理层芯片TLK1221展开的,即基于FPGA的TLK1221控制器的设计。图5为TLK1221芯片的内部功能模块图<sup>[5]</sup>,它内部可实现串并/并串转换、锁相环、时钟恢复等功能。可以看出,TLK1221既可以用作高速大流量数据信道—数据率可高达1Gb/s

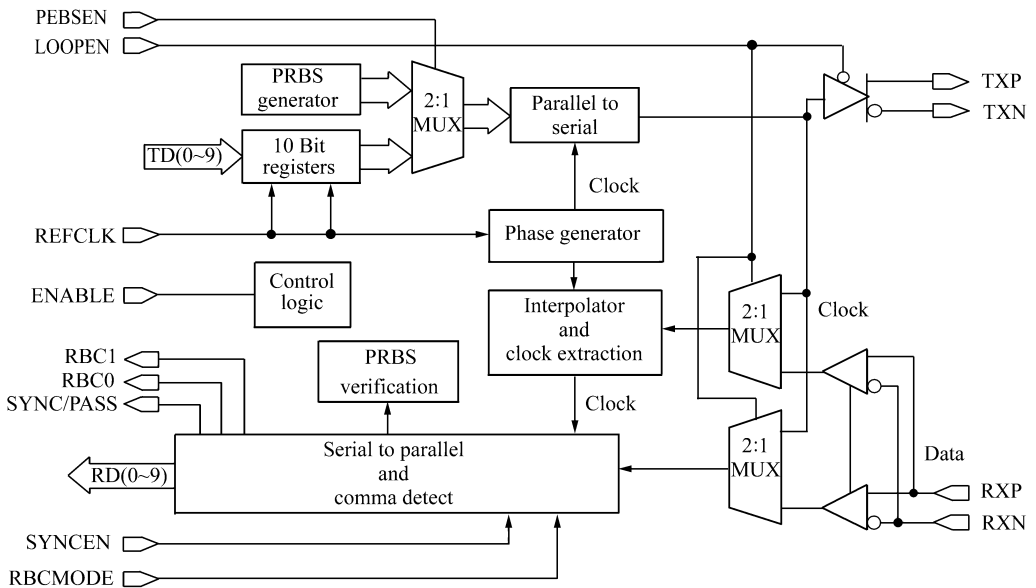


图5 TLK1221芯片内部结构框图

Fig.5 Structure diagram of TLK1221

的 10 位输入输出信道,也可以用于高速串行数据接口—数据传输率可达 0.6 ~ 1.3 Gb/s 的串行输出。

基于光纤的千兆以太网物理层也是分为 3 个子层,物理编码子层(PCS)、物理介质访问子层(PMA)和物理介质依赖子层(PMD)。

PCS 子层需要进行千兆以太网/光纤数据格式的转换,这将在后续部分进行介绍。

PMA 子层使用了串行并行转换器设备,集成在 TLK1221 芯片内部。它是一种时分多路复用、点对点的通信技术,即在发送端多路低速将并行信号转换成高速串行信号,经过传输媒体(光缆或铜线),最后在接收端将高速串行信号重新转换成低速并行信号。这种点对点的串行通信技术充分利用了传输媒体的信道容量,提高了信道的

传输效率,降低了通信成本。

PMD 子层使用了光收发器,它是将输入电压变化状态变为光波或光脉冲并能在光缆中传输的设备,即实现光电转换功能<sup>[6]</sup>。本文选用的光收发器采用了 LVPECL 电平,SC 光纤接口,工作在 1 310 nm 波段,最长传输距离为 10 km。

因 TLK1221 芯片内部功能比较强大,该控制器设计相对简单。将 RBCMODE 置为 1,设置成双速率模式。接入参考时钟来自 FPGA 的 25 MHz 时钟 clk,对其进行 4 倍频后达到 100 MHz,有效 10 位并行数据经 TD[0 ~ 9] 输入 TLK1221 芯片并经过并串转换处理以后,传输速率达 1 Gb/s 的串行数据流向下一级继续传输。图 5 给出了 TLK1221 控制器的 FPGA 实现在 Quartus II 中内嵌逻辑分析仪下的分析结果。

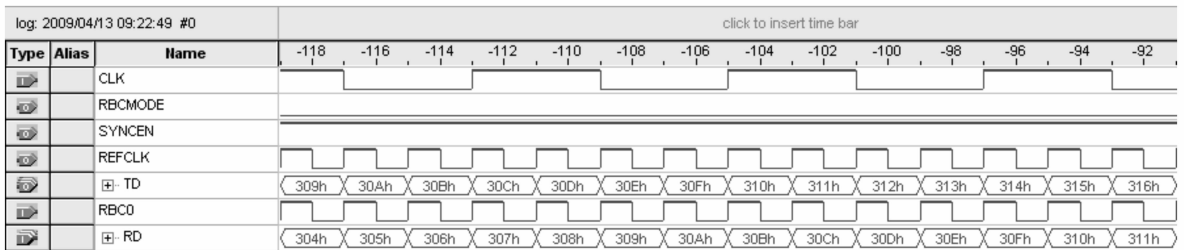


图 6 TLK1221 控制器的逻辑分析结果

Fig. 6 Analysis result of TLK1221 controller

### 3.3 千兆以太网/光纤数据格式转换

千兆以太网物理层芯片的数据位数为 8 bit,而光纤物理层传输芯片的数据位数为 10 bit,因此需要在 FPGA 中实现以太网数据的缓冲和 8 bit 数据与 10 bit 数据之间的转换,即在 PCS 子层进行 8B/10B 编码。该编码方式应用很广泛,是目前许多高速串行总线采用的编码机制。它的重要特性是保证 DC 平衡,采用 8B/10B 编码方式,可使得发送的“0”、“1”数量保持基本一致,从而没有直流电荷的积累,消除了任何形式的基线漂移。连续的“1”或“0”不超过 5 位,即每 5 个连续的“1”或“0”后必须插入一位“0”或“1”,从而保证信号 DC 平衡。也就是说,在链路超时时不致发

生 DC 失调,通过 8B/10B 编码,可以保证传输的数据串在接收端能够被正确复原。除此之外,利用一些特殊的代码(在 PCI-Express 总线中为 K 码),还可以帮助接收端进行还原的工作,并且能够在早期发现数据位的传输错误,抑制错误继续发生。

图 7 是 FPGA 中的内部模块结构图,它主要实现了以太网数据的缓冲以及光纤以太网中的 PCS 子层,可支持数据和命令的传输,编码极性调整等功能。数据从输入到输出只需要 3 个时钟周期的延时,输入信号为标准 GMII 接口格式,输出信号需要与 TLK1221 的 PMA 子层相连。

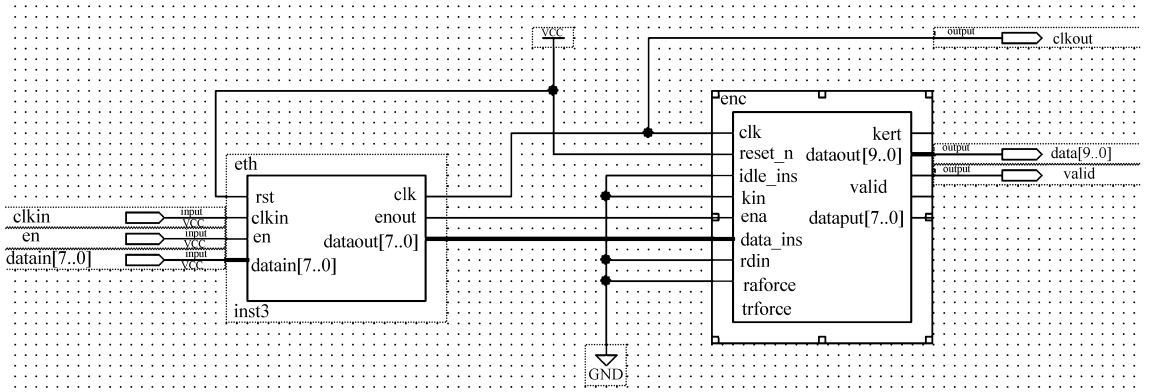


图7 数据格式转换的FPGA实现

Fig.7 FPGA implementation of conversion of data format

## 4 结 论

设计了应用于高速实时数字视频传输系统的转换器。使用 Verilog HDL 进行各个模块的代码编写,在 Quartus II 软件平台上进行代码编译综合

和功能仿真,并全部测试通过。该转换器目前已应用到高清晰度 LED 大屏幕显示器中,满足了 LED 大屏幕显示器实时数字视频传输的要求,实现了千兆以太网双绞线和光纤两种介质间的互联。

## 参考文献:

- [1] 陈应旭,吴盛芬.千兆以太网技术浅析[J].计算机与通信,2001,10:42-45.  
CHEN Y X,WU SH F. Analysis of gigabit Ethernet technology[J]. *Computer and Communication*,2001,10:42-45. (in Chinese)
- [2] 徐洪波,俞承芳.基于FPGA的以太网MAC子层协议设计实现[J].复旦学报(自然科学版),2004,43(1):50-61.  
XU H B,YU CH F. Implementation of Ethernet MAC based on FPGA[J]. *J. Fudan University(Natural Science)*,2004,43(1):50-61. (in Chinese)
- [3] 韩红霞,郭劲,曹立华,等.利用光纤进行多路数据与视频图像信息混合传输[J].光学精密工程,2005,13:30-33.  
HAN H X,GUO J,CAO L H, et al. Design of mixed transmission of multi-channel low-speed digital signals and high-speed video signals using optical fiber[J]. *Opt. Precision Eng.*,2005,13:30-33. (in Chinese)
- [4] 曹汉房.数字电路与逻辑设计[M].武汉:华中科技大学出版社,2003.  
CAO H F. *Digital Circuit and Logical Design*[M]. Wuhan:Huazhong University of Science and Technology Press,2003. (in Chinese)
- [5] Texas Instruments Corp. *TLK1221 Ethernet Transceiver Datasheet*[EB/OL]. [2009-07]. <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/tlk1221.pdf>
- [6] 郭玉彬,霍佳雨,靳江涛,等. LiNbO<sub>3</sub> 外调制器的 10 Gbit/s 光纤传输系统[J].光学精密工程,2007,15(1):22-26.  
GUO Y B,HUO J Y,JIN J T, et al. 10 Gbit/s fiber-optic transmission system using a LiNbO<sub>3</sub> external modulator[J]. *Opt. Precision Eng.*,2007,15(1):22-26. (in Chinese)

作者简介:于洪涛(1985—),男,硕士,主要研究方向为基于光纤的视频传输与图像处理。E-mail:hongtaodi@163.com

丁铁夫(1946—),男,博士,研究员,博士生导师,研究方向为数字通信与图像处理。

E-mail:dingtfe@ciomp.ac.cn