

10GBASE-X 单通道光传输系统物理层设计*

赵玲玲^{1,2}, 吴志勇¹, 高世杰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 研究生院, 北京 100039)

摘要: 研究了符合 IEEE 标准的万兆以太网 10BASE-X 物理层技术, 建立了单通道串行光传输系统。对系统原理进行了分析, 该系统由数据转换电路和光收发模块组成。利用 FPGA 实现 XGMII 和 XAUI 之间的转换, 物理层芯片实现 XAUI 和 XFI 的转换, 光收发器实现光/电、电/光转换。经实践证明, 该单波长光传输系统的数据传输容量达到了 10Gbps 并给出了仿真结果。

关键词: 10Gbps 附属单元接口; XFP; 10Gbps; 物理层; 单通道

中图分类号: TN919.3 **文献标识码:** A

1 引言

随着工程项目中海量数据高速低损耗实时传输的需要, 为了实现数据通信系统海量数据传输, 提高光电测控设备在工程应用中数据传输的距离, 根据 10GE 物理层模型, 设计了满足工程需求的高速光传输系统。IEEE802.3ae 标准所规定的 10GE 物理层电平接口标准有 XAUI (10 Gigabit Attachment Unit Interface, 10GE 连接单元接口)、XGMII (10 Gigabit Medium Independent Interface, 10Gb 介质无关接口) 和 XSBI (10 Gigabit Sixteen Bit Interface, 万兆以太网 16 比特接口), 按 PCS (Physical Coding Sublayer, 物理编码子层) 编码与 PMA (Physical Medium Attachment, 物理媒体附属子层) 接口的不同, 可以通过 10GBASE-R、10GBASE-X 和 10GBASE-W 三种物理层结构实现 10GE^[1]。这三种结构都是通过 XGMII 接口与数据链路层相连。10GBASE-X PCS 编码采用 8B/10B 编码, PMA 与 PMD (Physical Medium Dependent, 物理介质相关子层) 接口为 XAUI。10GBASE-R 和 10GBASE-W 的 PCS 编码采用 64B/66B 编码, PCS 与 PMA 接口为 XSBI。本文基于 10GBASE-X, 电接口设计采用 XAUI。

IEEE802.3 标准对于 10BASE-X 的 PMD 类型未规定是并行或串行形式。对于串行单纤工作模式, PMD 可采用 XENPAK 光模块实现, 也可以采用 XFP 光模块实现。由于 XFP 光模块体积小、灵活性高、成本低的优点极大满足工程需要, 本文采用 XFP 光模块实现传输带宽达 10Gbps 的单通道光传输系统。

2 工作原理

系统框图如图 1 所示。FPGA 完成 XGMII 和 XAUI 之间的数据转换。串/并转换和并/串转换电路在物理层转换芯片内完成, 实现 XAUI 与 XFI 之间的转换功能。XFP 光模块实现光/电、电/光转换功能。物理层转换芯片与

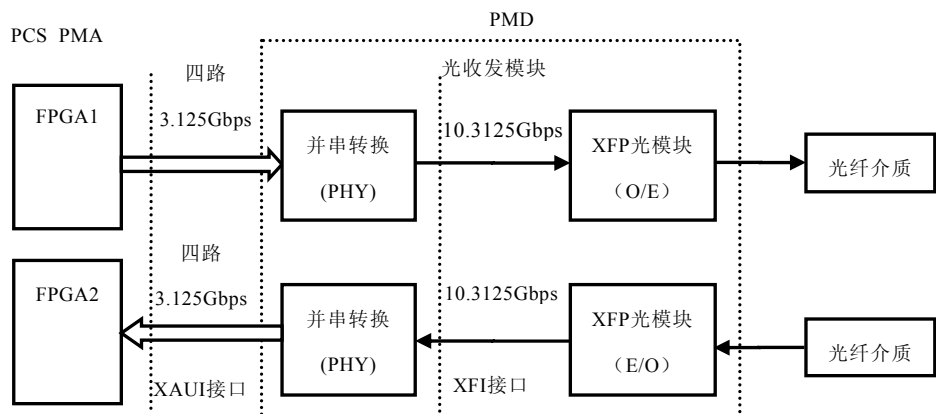


图 1 系统结构框图

* 收稿日期: 2010-06-26 修订日期: 2010-07-07
基金项目: 中国科学院基金资助 (085231B090)

XFP 光模块组成光收发模块, 实现 PMD 全部功能。采用单模光纤作为传输媒介。

发送方向上, FPGA 内部收发器 ALT2GXB 两侧接口分别是 64 位 156.25MHz 的 TTL 电信号和 4 路 3.125Gbps 的 PCML 差分电信号。并串转换电路将接收到的四路并行差分信号复用并编码, 转换成高速串行信号发送出去, 芯片两侧接口分别是四路 3.125Gbps 的 XAUI 电信号和 10.3125Gbps 的串行 XFI 电信号。XFP 光模块将高速电信号转换为光信号, 经光纤介质传输。本设计经两次转换, 第一次转换是在 FPGA 内部进行的数字逻辑转换, 将 64 位数据转换成 4 路差分信号流, 第二次转换是在物理层转换芯片内进行的串/并、并/串转换, 将四路并行电信号转成一路串行电信号。光接收方向数据处理过程与光发送方向的数据转化过程相逆。光模块将接收到的光信号转换成电信号, 此高速串行电信号经解复用、解码后转换成 XAUI 差分信号流。该信号流被送到 FPGA 内部收发器模块, 经数字逻辑转换电路, 恢复出 XGMII 信号。

XAUI 接口由四个差分通道组成, 通过通道时延自动纠正技术克服信号时延, 利用收发器内 FIFO 存储器补偿信道中畸变、时延和定时偏差。这种规范由 4 个信号流组成, 每个信号流的速率为 3.125Gbps, 总速率为 12.5Gbps。由于采用 8B/10B 编码, 有效数据传输速率为 10Gbps。

3 系统设计

3.1 数据转换电路设计及实现

选用两块 Arria GX 系列 FPGA (型号为 EP1AGX20C780C6) 实现 PCS 和 PMA 全部功能。由于没有采用时钟双沿采样数据, 因此与 PCS 模块连接的数据和控制位宽均比 IEEE802.3 协议中规定的 XGMII 位宽增加一倍, 分别为 64 位和 8 位。

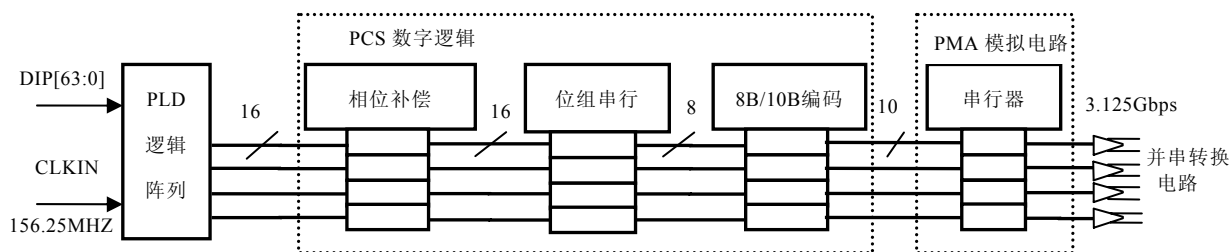


图2 发送方向数据转换流程图

3.1.1 发送方向数据转换功能实现

发送方向数据转换如图 2 所示。64 位数据经 PLD 逻辑阵列形成四路 16 位并行数据流, 即位宽增加一倍的 XGMII 数据流。相位补偿 FIFO 补偿接收到的四路并行 PLD 时钟和其余数字逻辑传输器时钟之间的相位差。在位组串行器中将 16 位数据转换成 8 位数据, 为了实现信号的直流平衡、时钟同步^[2], 将四路 8 位宽的

并行数据经过 8B/10B 编码, 变成 10 位宽的数据。至此信道总的传输速率由原来的 2.5Gbps 变成了 3.125Gbps。再经串行器进行 10:1 的并串转换。形成单路信号传输率为 3.125Gbps 的 PCML 差分信号。

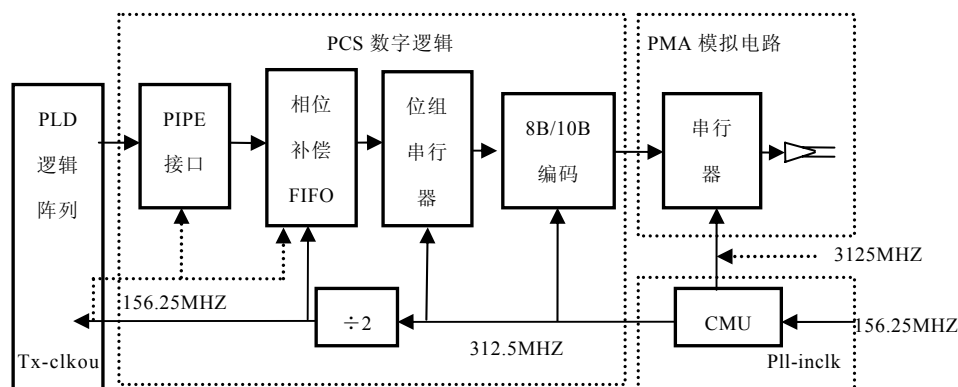


图3 收发器发送方向时钟管理图

发送方向时钟分配如图 3 所示。本文设计的 pll_inclk 由专用基准时钟输入引脚 (REFCLK0 或 REFCLK1) 输入, 参考时钟频率为 156.25MHz。经锁相环 10 倍频, 生成 1562.5MHz 的高速串行时钟。该高速时钟同时经四个本地时钟分配器模块 5 分频产生 312.5MHz 低速并行时钟, 作为并行信道其他数字逻辑的参考时钟。进入相位补偿 FIFO 的时钟是经低速并行时钟 2 分频得到的。采用 312.5MHz 的低速时钟将进入到串行器的 10 位数据锁存, 当数据输出时采用 3125MHz 的高速有效串行时钟, 完成 10: 1 的并串转换。

3.1.2 接收方向数据转换功能实现

XAUI 信号经解串器 1: 10 串并转换, 通过字节对齐, 信道去斜移, 速率匹配器矫正。由于整个并行传输过程中, 每个通道到达接收模块的时延并不相同, 从而产生斜移^[3], 信道去斜移模块用来精确校正 40UI (12.8ns) 内的信道间延时, 降低了 PCB 设计难度。速率匹配器用来匹配晶振间 100PPM 的频率变化。然后经过 8B/10B 解码转换成四路 8 位宽的数据。位组解串器将输入的 8 位数据转换成 16 位数据, 通过相位补偿寄存器对其他数字逻辑时钟和 PLD 时钟之间进行相位矫正, 恢复出数据同步时钟信号。

锁相环接收器与时钟恢复单元协同产生两个时钟: 一个是 1562.5MHz 高速串行时钟, 提供给解串器; 另一个是 312.5MHz 低速并行时钟, 作为接收机其他数字逻辑的参考时钟。其中进入相位补偿 FIFO 的时钟是经低速并行时钟 2 分频得到的。锁相环接收器通过 rx_locktorefclk 和 rx_locktodata 信号来控制锁定输入基准时钟还是锁定即将到来的串行数据。

3.2 光收发模块设计

光收发模块由光/电、电/光转换电路和串/并、并/串转换电路两部分组成。其结构框图参看系统结构框图, 如图 1 所示。光/电信号和电/光信号转换电路直接在 XFP 光模块 (型号为 GACX-1395-10) 中实现, 该光模块同时有数据诊断功能, 实时的监控光模块的各种参数, 如温度、激光器偏执电流、发送光功率、接收光功率、工作电压等^[5]。串/并、并/串转换电路在物理层转换芯片 (TI 公司生产型号为 TLK10021) 内实现, 完成 XAUI 的高速并行数据和 XFI 的高速串行数据之间的转换。

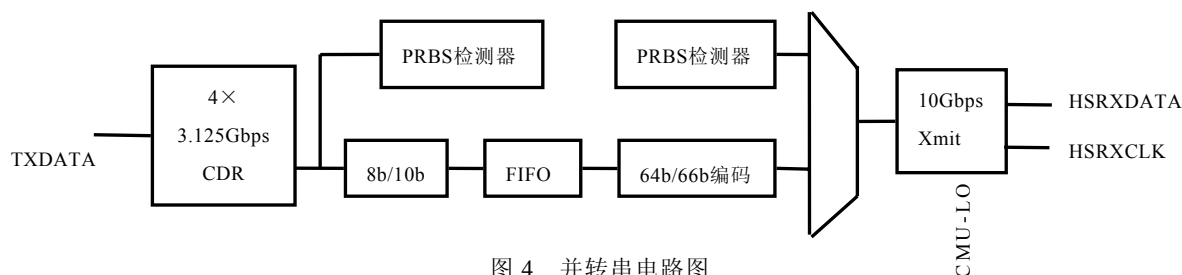


图 4 并转串电路图

并转串电路包括四个 3.125Gbps 接收器、解码逻辑、FIFO、输出编码器和一个 10Gbps 时钟驱动器, 电路图如图 4 所示。TLK10021 的四个接口以 XAUI 格式接收并行数据, 在数据传输之前被成帧、排列并编码。4 路 XAUI 数据以 3.125Gbp 数据速率输入接收器和时钟恢复单元。解码逻辑连接四个差分对, 将四路并行数据流转换成 10 位编码命令。排序后从传输 FIFO 中读出, 进行 64b/66b 编码, 然后送到串行输出发送器发送出去。至此 64 位并行电信号转换成高速串行差分电信号, XFP 光模块对其进行电/光转换, 由一根单模光纤传输, 实现单通道光传输系统。

4 实验结果及分析

在 ATERA 的 QuartusII9.0 开发环境下对 FPGA 进行编程, 通过 Verilog 语言编程实现收发器配置, 使用 Modelsim6.4a 对收发器仿真, XAUI 自发自收功能验证仿真波形如图 5 所示。发送方向, 发送端发送四路相同的 16 位递增数据 $\text{txdata}[15:0]$, 共计 64 路, 传输变化率为 156.25MHz, 经 ALT2GXB 发送器, 形成 4 对 3.125Gbps 的 PCML 差分数据流 txn 、 txp ; txn1 、 txp1 ; txn2 、 txp2 ; txn3 、 txp3 。发

送方向接收端与接收方向发送端连接, 在接收方向的接收端能够准确无误恢复出发送的 64 路信号 dataout[15:0]、dataout1[15:0]、dataout2[15:0]、dataout3[15:0]。经分析, CRC 校验、发送缓冲、编码、锁存等使得发送端与接收端线路产生延迟。经测量与计算, 线路延迟约为 316ns。

在工程应用中, 一般采用 Camera link 接口相机传送图像信号, 而这种相机的最高频率能够达到 80MHz, 也有 85MHz 的产品。这里采用 3 个 Camera link 接口的相机同时发送 80MHz 帧信号, 使得发送端发送的数据量为 10Gbps。实际系统如图 6 所示。经自发自收回路, 并采用误码仪在接收端测试接收到的帧信号, 误码率不超过 10^{-12} , 满足系统误码要求。也可以采用低频相机对系统进行验证, 但是会增加相机的个数。IEEE802.3ae 标准定义了 10G 以太网光接口有七种类型, 本实验根据 10GBASE-LX4 标准, 采用 1310nm 激光器, 一根单模光纤传输, 传输距离可达 10km。该标准定义也可采用多模光纤, 传输距离为 300m。

5 结束语

本文通过对收发器组成原理的分析, 在 FPGA 上配置了高速 10Gbps 的 IP 核, 实现了发射和接收方向 XAUI 功能模块的设计和仿真。使用物理层芯片和 XFP 光模块实现了单通道数据传输, 使得传输带宽达到 10.3125Gbit/s。设计满足光电测控设备可靠性、稳定性、实时性的需求, 为单通道 10Gbps 远距离传输的应用打下了基础。

参考文献:

- [1] 苗澎, 王志功, 李戡. 万兆以太网物理层技术[J]. 电路与系统学报, 2006, 11(2): 69-73.
- [2] 陈雄斌, 刘丰满, 刘博, 唐君, 陈弘达. 基于 STM264 的甚短距离并行光传输系统[J]. 光电子激光, 2008, 19(8): 1050-1053.
- [3] 毛陆虹, 贺传峰, 戴居丰, 陈弘达, 周毅, 陈雄斌. 10Gbit/s 甚短距离传输系统接收模块研究[J]. 电路与系统学报, 2005, 4(10): 66-70.
- [4] ALTERA Arria GX Transceiver User Guide [M/OL]. http://www.altera.com/literature/hb/agx/agx_5v1.pdf, 2009.
- [5] 宋国栋, 程伟森, 程国栋. 10G 以太网光接口及其实现. 中兴通讯技术[J]. 2008, 15(29): 40-43.

作者简介: 赵玲玲(1985-), 女, 吉林四平人, 硕士研究生, 主要研究方向: 高速光传输系统的研究; 吴志勇(1965-), 内蒙古通辽市人, 研究员, 博士生导师, 主要从事光电测控设备的总体设计及光纤数据通信技术的研

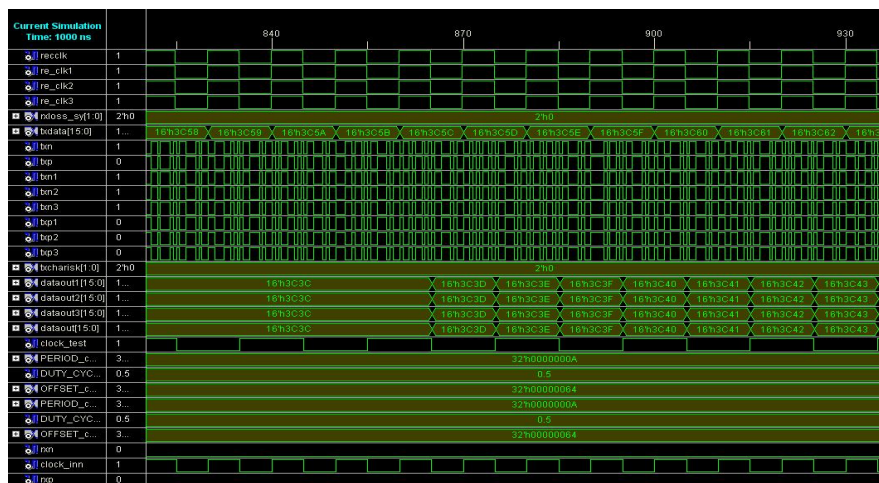


图5 收发器模块仿真波形图

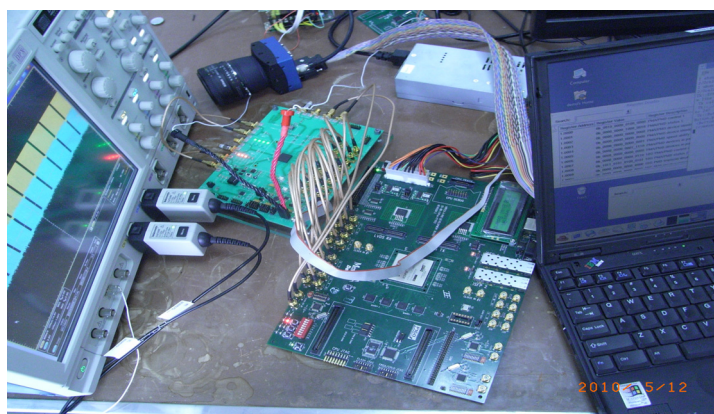


图6 自发自收测试系统实物图

- [7] J Moberg, M Lofgren, R S Karlsson. Throughput of the WCDMA Random Access Channel [A]. **IST Mobile Communication Summit** [C]. Galway, Ireland, 2000-10.
- [8] V Y H Kueh1, A Capellacci, R Tafazolli, B G. Evans. W-CDMA random access channel transmission enhancement for Satellite-UMTS [A]. **Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC '2002)** [C]. Lisbon, Portugal, 2002-09.
- [9] E Lutz, D Cygan, M Dippold, F Dolainsky, W Papke. The land mobile satellite communication channel-Recording, statistics and channel model [J]. **IEEE Trans. Veh. Technol.**, 1991, 40(2): 375-386.
- [10] ITU, Rec. ITU-R M.1225

作者简介: 张丙杰 (1980-), 男, 河南平顶山人, 博士研究生, 主要研究方向为卫星移动通信; 胡捍英 (1961-), 男, 河南南阳人, 解放军信息工程大学教授, 博士生导师, 国家 863 计划信息技术领域通信技术组专家, 主要研究方向为移动通信系统; 王大鸣 (1971-), 男, 辽宁大连人, 信息工程大学副教授, 博士, 硕士生导师, 主要研究方向为移动通信系统。

A new random access method for GEO satellite CDMA communication system

ZHANG Bing-jie, HU Han-ying, Wang Da-ming

(Institute of Information Engineering, PLA Information Engineering University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: It is well known that random access method plays a key role in GEO satellite CDMA communication system, which dominates the performance of access request for users. In this paper, a new random access method is discussed, which can be used in GEO satellite communication system and others characterized long transmission delay. Based on the random access design in S-UMTS system, a new structure of access frame and slots is proposed and a new procedure of transmitting access request corresponding to the new structure is suggested. In the new structure, the bit error rate of message is improved for the increased spreading ratio of access message and the captured probability of access preamble is increased along with its length and numbers of preamble codes. In order to operate in GEO satellite communication environment with different long transmission delays, the guard interval of the access frame should be increased. Simulation results show that the average access time is remarkably decreased by adopting the proposal transmission procedure of access request.

Key words: CDMA; ALOHA; S-UMTS; access frame; access slot; preamble code

(续第 115 页) (from page 115)

The design of single-channel optical transmission system based on 10GBASE-X

ZHAO Ling-ling^{1,2}, WU Zhi-yong¹, GAO Shi-jie¹

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

2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Based on the study of the 10BASE-X Gigabit Ethernet physical layer technology which meets the IEEE standard, a single-channel optical transmission system is established. We analyze the system working principle. The system consists of data conversion circuits and optical transceiver modules. The conversion between the XGMII and XAUI is achieved in FPGA, the conversion between the XAUI and XFI is carried out by a physical layer chip, and the conversion between optical and electronic is completed in optical transceiver. Be testified by practice, the single-wavelength optical transmission system reaches a 10Gbps data transmission capacity, and the simulation results are given.

Key words: XAUI; XFP; 10Gbps; physical layer; single-channel