

文章编号:1007-2780(2015)01-0114-06

基于千兆网接口的星敏感器图像显示与存储

张磊*,何昕,魏仲慧,王方雨

(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:为了提高星敏感器地检设备中图像采集的便携型,设计了基于千兆网接口的星敏感器图像显示与存储系统。系统硬件平台包括输入图像解码与输出图像编码两部分,以 AX88180 和 M88E1111 为关键器件,在 FPGA 的控制下完成 CameraLink 图像到千兆网图像的协议转换,上位机软件通过 Socket 和多线程技术采集实时原始图像。通过实际应用证明,该系统满足图像数据的传输速度要求,能够方便地实现星敏感器图像的显示与存储。

关键词:星敏感器;图像;CameraLink;千兆网

中图分类号: **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20153001.0114

Image display and storage of star sensor based on Gigabit Ethernet

ZHANG Lei*, HE Xin, WEI Zhong-hui, WANG Fang-yu

(*ChangChun Institute of Optics, Fine Mechanic and Physics,
Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China*)

Abstract: Image plays a very important role in star sensor. In order to improve the portability of the image acquisition in testing device, the image display and storage system of star sensor based on Gigabit Ethernet is designed and implemented. Image codec is the main parts of the platform, and AX88180 and M88E1111 are taken as critical components. Under the control of the FPGA, images from CameraLink protocol are converted to Gigabit Ethernet, and the PC software collect the original images via Socket and multi-thread technology. Experiment results indicate that the system meets the requirements of the image data transmission rate, and images from star sensor could be displayed and stored conveniently.

Key words: star sensor; image; CameraLink; Gigabit Ethernet

1 引言

星敏感器是一种以恒星为参考系的天文导航装置,是迄今为止最精密且漂移最小的姿态测量部件^[1-2]。由于星敏感器在使用时可以为载体直

接提供高精度的空间姿态测量信息,其外部接口通常只需包括电源接口、通信接口两类。电源接口用以提供星敏感器正常工作的电源,通信接口用以实现星敏感器与系统的数据通信。而图像作为最直观、具体的信息载体,虽然在使用时因传输信道带宽的限制或无需事后处理,将其封闭,但在

收稿日期:2014-06-11;修订日期:2014-08-12.

基金项目:中国科学院知识创新工程领域前沿项目

* 通信联系人,E-mail:zlxrl@tom.com

地面功能测试或观星试验中,可以看到实时星空图像,将图像下载存储后可以用来考察星图处理及识别算法,另一方面,在环境试验中可以用来监视实时图像,了解设备的状态,因此,图像是地面检测环节中重要的监测和验证手段。

为适应航天产品对重量、功耗和体积的要求,星敏传感器均采用嵌入式的设计方案,集成化程度越来越高,在图像接口方面,为满足小型化和电磁兼容等要求,不会使用标准的图像接口,取而代之的是尺寸小、密封性较好的航天连接器。而在图像传输协议上,则会采用广泛应用的 CameraLink 图像协议。这就对地面检测设备中的图像采集、存储提出了较高的要求,通常需要配备较笨重的台式机箱与专用的 PCI 图像采集卡,成本较高,便携性极差。随着科学技术的进步,千兆网,即千兆以太网,逐渐成为包括笔记本在内的计算机的标准配置,采用千兆以太网传输星敏传感器图像具有传输带宽高、传输距离远和性价比高的特点,而且对地面检测设备的要求也大大降低。

本文基于上述思想,从模块化的角度出发,采用千兆网控制器 AX88180 芯片、物理层收发器 M88E1111 芯片以及 Windows 网络套接字,设计了千兆网图像采集传输系统。实验证明,采用该千兆网图像采集系统,能很好地完成对星敏传感器图像的采集、显示与存储。

2 系统设计

千兆以太网采集、传输星敏传感器图像的方案如图 1 所示。星敏传感器产生的数字图像经千兆网图像采集、传输系统采集编码后,以网络数据流的形式输出,在计算机端无需特别的接口卡或昂贵且复杂的图像采集卡,只需一块普通的千兆网卡就可以从外部图像源接收实时的非压缩图像,千兆带宽满足了绝大多数星敏传感器图像传输应用的要求,同时这也降低了对图像采集计算机的配置要求,使用便携式笔记本电脑即可完成图像的采集、显示与存储。

采用千兆网传输图像首先解决图像源接口协议转换的问题,星敏传感器图像以 CameraLink 协议传输, CameraLink 是 NI 公司基于 Channel Link 技术发展而来的,而 Channel Link 以 LVDS

规范为基础。CameraLink 信号以 7 : 1 的方式串行化为 4 条 LVDS 数据流, CameraLink 接收器接收 4 路 LVDS 数据信号和 1 路 LVDS 时钟信号,将数据流转换为 28 位的 CMOS/TTL 并行数据, 5 对线传输 28 路信号。

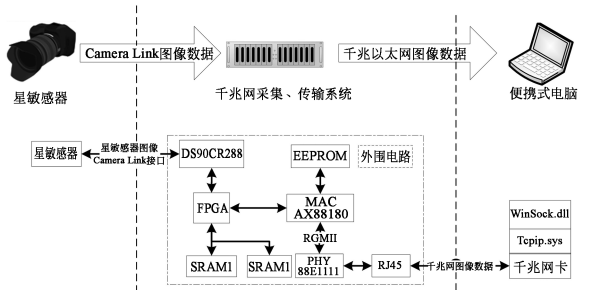


图 1 千兆网图像采集、传输方案

Fig. 1 Scheme of image acquisition and transmission over Gigabit Ethernet

其次,在网络传输方面,底层采用千兆网 MAC 控制器和 PHY 收发器件实现网络数据的传输。在网络协议方面,为保证通讯协议的兼容性和网络传输效率,在传输层选择 UDP 协议,同时,考虑 UDP 协议是一种不可靠的传输层协议,在应用层还要再设计图像传输协议以保证图像网络传输的可靠性。

本设计中星敏传感器图像的分辨率是 $1\,024 \times 1\,024$,数据更新率 10 Hz,像素量化位数 14 bit,则数据量 140 Mb/s,而千兆网的数据传输能力标称 1 Gb/s,远远超过数据源的带宽,所以采用千兆网采集星敏传感器图像完全满足需求。

2.1 关键元器件介绍

2.1.1 千兆网控制器 AX88180

AX88180 是台湾 ASIX 公司推出的全球第一款高性能低成本的 Non-PCI 千兆以太网控制器,符合 IEEE802.3/IEEE 802.3u/IEEE 802.3ab 协议,适用于多种需要高速接入网络的嵌入式系统。

AX88180 内置 10/100/1 000 Mb/s 以太网媒体存取控制器(MAC),与 PHY 之间采用 RG-MII 接口;内置主机接口控制器,可以与 16/32 位主机方便连接,寻址方式与 SRAM 相同;内置 40 KB SRAM 网络封包缓存器,其中 32 KB 用于从 PHY 接收数据包,8 KB 用于主机发送数据包到 PHY,可以用高效方式进行封包的存储、检索与修改;内置 256 字节的配置寄存器,用于主机控制

和参数设置;内置 EEPROM 接口;内置 IP/TCP/UDP 校验和,可大大减小微控制器的运算负载,改善传输反应时间。图 2 是 AX88180 的内部结构框图^[3]。

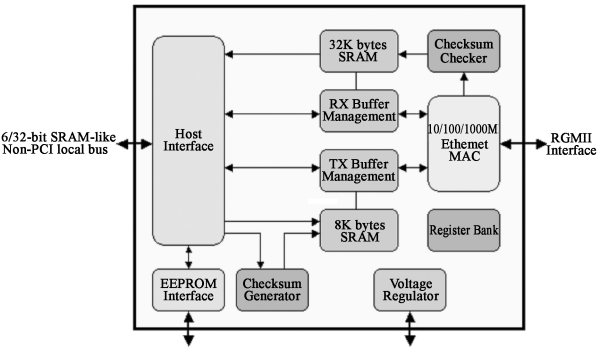


图 2 AX88180 内部结构框图
Fig. 2 Structure of AX88180

2.1.2 物理层收发器 M88E1111

Marvell M88E1111 是一款千兆以太网收发

器物理层芯片,采用标准的 CMOS 工艺制造,支持 1000BASE-T、100BASE-TX、10BASE-T 应用,支持自动协商功能(Auto-Negotiation),支持传输介质自动检测(Auto-Media Detect),支持网络收发线对的自动检测和交叉(MDI/MDIX Crossover),可以在五类非屏蔽双绞线上进行数据的收发。

M88E1111 内部组成如图 3 所示,它包括了千兆以太网物理层 PCS、PMA、PMD 子层的所有功能。其发送端集成一个多功能的 D/A 转换器,可以支持 4D PAM5、MLT3 和曼彻斯特编码,分别支持 1000BASE-T、100BASE-TX 和 10BASE-T 的链路编码,其中在 100BASE-X 应用中,在进行链路编码之前还要经过 4B/5B 编码。接收端集成一个高速 A/D 转换器以 125 MHz 的频率采样输入信号,首先采用回声消除、近端串扰抑制等多种手段提升信号质量,再经过接收 PCS 层解码后交付给 MAC 层^[4]。

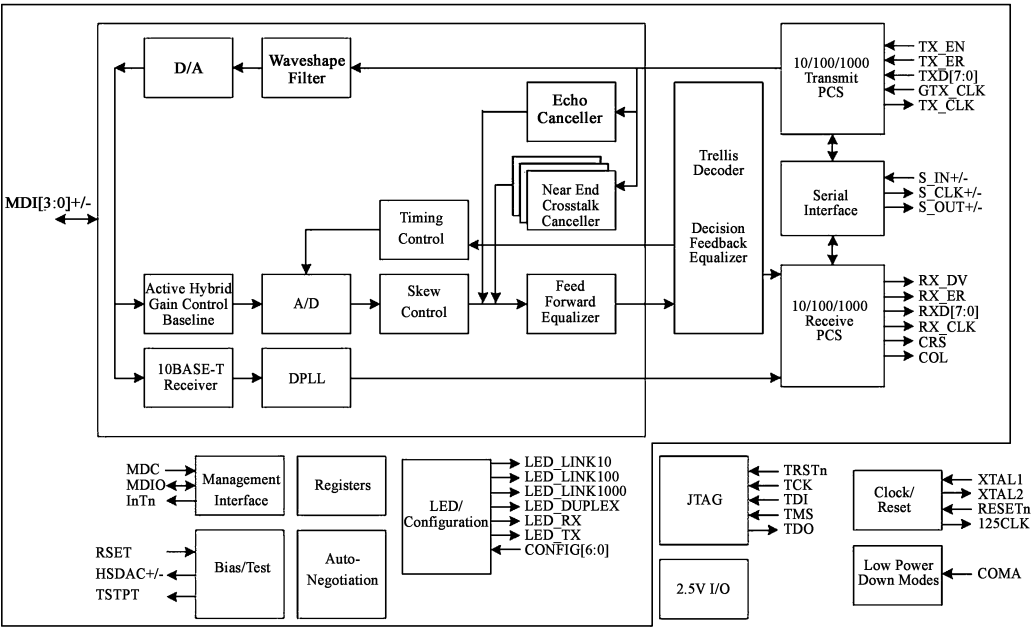


图 3 M88E1111 内部功能框图
Fig. 3 Structure of M88E1111

2.2 硬件设计

基于千兆网的星敏感器图像采集系统硬件架构图如图 1 所示,由解码芯片、FPGA、SRAM、网络 MAC 芯片、PHY 芯片及 RJ45 接口组成。系统采用 Xilinx 系列的 XC2V3000 FPGA 芯片作

为主控制器,控制千兆网络芯片的初始化、星敏感器图像数据采集以及网络数据的组帧发送。选择 DS90CR288 作为 CameraLink 图像解码芯片、AX88180 和 M88E1111 作为网络驱动控制芯片,MAC 芯片 AX88180 负责将标准的组帧的网络数

据包传送给 PHY 芯片 88E1111,完成图像数据的发送。

系统上电后,先初始化网络芯片 AX88180 和 M88E1111,完成寄存器的配置^[5];当有星敏传感器图像输入时,先由 DS90CR288 芯片解码;解码的图像经 FPGA 控制在两片 SRAM 间进行乒乓缓存,同时,FPGA 取出将要发送的数据,组帧后写入 MAC 芯片的缓存中,在 FPGA 的控制下 PHY 芯片将图像数据通过 RJ45 接口发送到网络上。

2.2.1 图像解码

前端接口是 CameraLink 图像采集部分,完成对星敏传感器输出图像的解码。如图 4 所示是 CameraLink 接口 Base 模式的数字图像信号的时序关系图。根据 CameraLink 接口协议,一帧数字图像由场同步信号、行同步信号、像元时钟和多位图像数据组成,各信号均在像元时钟的上升沿是数据稳定时期。

图 4 中的信号由 TI 公司的 DS90CR288 解码芯片进行图像数据、行、场、时钟的 LVDS 和 TTL 通道之间的转换,将 CameraLink 接口中 5 对 LVDS 信号解码、转换到包括图像数据、行、场信号在内的 28 位 TTL 信号。

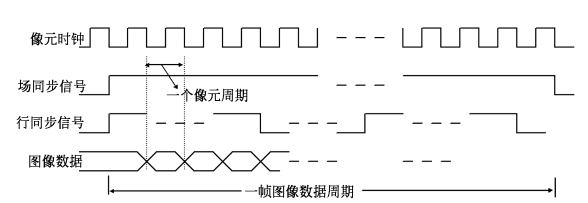


图 4 Camerlink 格式时序图

Fig. 4 Timing sequence of CameraLink data

2.2.2 网络芯片互连

千兆网进行数据传输是由千兆网的 MAC 芯片与 PHY 芯片之间交互实现的,其关键在于芯片间的接口互连,如图 5 所示为 FPGA、AX88180、M88E1111 与 RJ45 接口的连接关系图。

AX88180 支持 16/32 位的类 SRAM 主机接口,并支持与主机的同步及异步工作方式。本设计中选择 FPGA 作为主机,为 AX88180 提供 64 K 空间,其中 0000H-7FFFH 供数据接收使用,8000H-FBFFFH 供发送数据使用,另外,由于 FPGA 具有充足的引脚,为了实现较高的数据传输速率,选择 32 位的接口和异步操作的工作方式。

AX88180 与 FPGA 之间的连线主要是读、写及地址、数据总线,接口共包括片选信号 CSN、写信号 WEN、读信号 OEN、16 位地址总线 HA、32 位数据总线 HD,以及硬件复位信号 RESET、MAC 中断信号 INTN^[3]。

M88E1111 与 AX88180 之间通过简化后的 RGMII 接口连接,它通过数据引脚和控制信号的复用将 GMII 接口的引脚数减少到 12 个。M88E1111 与 AX88180 间接口主要包括发送数据 TXD、发送时钟 TXCX、发送使能 TXEN、接收数据 RXD、接收时钟 RXCX、接收使能 RXDV、参考时钟信号 CLK125 以及 PHY 中断信号 PHY-INTN 等。

M88E1111 包含有大量的管理寄存器,提供了通过 MDC 和 MDIO 引脚访问 PHY 内部寄存器的功能,MDC 是管理数据时钟输入,MDIO 是一个与 MDC 保持同步的可读可写的双向接口,FPGA 通过 MDC/MDIO 管理接口访问 PHY 并进行串行配置^[4]。

MDI 是 PHY 芯片与物理介质的接口,与 RJ45 连接。

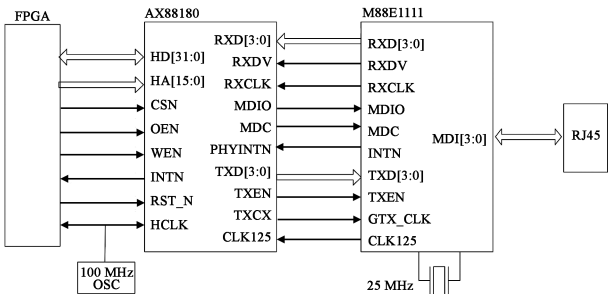


图 5 接口的连接关系图

Fig. 5 Interface connective relation

2.3 软件设计

当图像数据到达计算机网卡时,操作系统要将其解包交给上层应用软件,由应用软件负责图像重组、显示并记录在硬盘中。应用软件采用多线程的设计实现并行处理,一是可以避免因功能模块相互等待导致的数据丢失,二是可以避免软件在执行显示或存储时长时间占用 CPU 导致软件无法及时响应用户的界面操作。在网络协议的使用上,为了提高网络的传输效率,本设计在传输层选择 UDP 协议传输图像,在应用层设计图像协议来保证图像最终传输的可靠性与完整性,

UDP 是 IP 之上的最小服务,在 IP 数据报的基础上添加的首部最小,仅 8 个字节长,所携带的有效数据就相对较多,而且 UDP 不必建立和释放连接,减少了开销和时延,提高了传输效率^[6]。

主线程启动后,根据需要创建图像网络接收、显示及存储 3 个线程,多个线程并发地运行在同一进程中,共同使用进程中的所有地址空间、全局变量和系统资源,线程间使用事件对象(Event)进行同步。

网络通讯采用异步事件通知的 WSAEventSelect 模型,允许应用软件在套接字 Socket 上接收基于事件的网络通知,该模型经由事件对象句柄通知^[7]。部分网络初始化的代码如下,首先,初始化一个网络套接字,为网络接收事件创建一个事件对象,然后调用 WSAEventSelect 函数将网络事件和事件对象关联起来,启动网络数据接收线程。

```
WSAEVENT hReadEvent;
SOCKET sock;
sock=socket(AF_INET,SOCK_DGRAM,
IPPROTO_UDP);
sockaddr_in sin;
bind(sock,(LPSOCKADDR)&sin,sizeof(sin));
hReadEvent=WSACreateEvent();
WSAEventSelect(sock,hReadEvent,FD_READ);//关联接收数据事件
AfxBeginThread(RecvDataFile,this);//启动接收图像数据线程
当有网络数据到达时,异步模型中指定的事件 FD_READ 发生,与其关联的事件对象 hReadEvent 被置位,等待事件对象的函数就会执行,调用 WSAEnumNetworkEvents 函数获取底层发生的网络事件,网络接收线程接收数据,当接收完一幅完整帧图像时,触发图像存储、显示线程工作。
UINT RecvDataFile(LPVOID pParam)//网络收线程
{
```

```
WSANETWORKEVENTS netevent;
while(true)
{
    WaitForSingleObject(hReadEvent,INFINITE); //等待事件对象被置位
```

```
WSAEnumNetworkEvents(sock,hReadEvent,&netevent);
ResetEvent(hReadEvent);
if(netevent.lNetworkEvents & FD_READ)
{
    Recvfrom(sock,buff,2500,0,(sockaddr*)&addr,&nLen);
    if(一幅图像完整)
    {
        if(图像存储标识置位)
            激活图像存储
            激活图像显示线程
    }
}
```

网络接收的数据为图像的原始数据,没有文件头以解析图像的分辨率及位数,可通过软件界面设置该图像属性,调用 StretchBlt 或 BitBlt 函数即可显示图像。因图像显示大部分时候用来监视,所以显示线程优先级较低,可以根据需要采用隔帧显示。

通过笔记本电脑进行观星试验,图 6 所示为应用软件在设置好图像分辨率、显示方式及存储标志后,实时采集并显示的猎户座附近的星图,实时检测的帧频为 10 帧/秒。



图 6 实时星图采集显示界面
Fig. 6 Star image acquisition and display

4 结 论

本文以千兆网为传输通道,进行了软、硬件的设计开发,完成星敏感器图像的显示与存储,降低

了对地面检测设备的要求,也大大提高了地检设备的便携性。

由于千兆网的传输带宽远高于所需传输的图像数据量,用 Socket 即可满足使用需求,如果存在数据量较大的情况,可以从以下两方面加以改

进:在网络数据接收方面,采用 Wincap 类库捕获来自网络的图像数据包,有效地减少丢包;在图像数据存储方面,采用双缓存结合写大文件的方式减少对磁盘的寻址及指针操作,从而有效地降低图像数据丢帧的概率。

参 考 文 献:

[1] 郝志航,王家琪. CCD 星跟踪器[J]. 光学精密工程,1991(6):73-78.
Hao Z H, Wang J Q. CCD star tracker [J]. *Optics and Precision Engineering*, 1991(6):73-78. (in Chinese)

[2] 张少迪,王延杰,孙宏海. 三角剖分以及径向基函数神经网络在星图识别中的应用[J]. 光学精密工程,2012,20(2):395-402.
Zhang S D, Wang Y J, Sun H H. Application of triangulation and RBF neural network to star pattern recognition [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012,20(2):395-402. (in Chinese)

[3] ASIX. AX88180 Datasheet[EB/OL]. <http://www.asix.com.tw>, 2007.

[4] MARVELL. M88E1111 Datasheet[EB/OL]. <http://www.marvell.com>, 2004.

[5] ASIX. AX88180 Software Program Guide[EB/OL]. <http://www.asix.com.tw>, 2008.

[6] 谢希仁. 计算机网络[M]. 北京:电子工业出版社,2003.
Xie X R. *Computer Network* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003. (in Chinese)

[7] 王艳平,张越. Windows 网络与通信程序设计[M]. 北京:人民邮电出版社,2006.
Wang Y P, Zhang Y. *Design of Network communication program for Windows* [M]. Beijing: Posts & Telecommunications Press, 2006. (in Chinese)

作者简介:张磊(1982—),男,吉林松原人,博士,副研究员,主要从事光电测量与数字图像处理等方面的工作。E-mail: zlxrl@tom.com