

文章编号: 1672-8785(2018)04-0012-06

高速红外视频采集系统设计

刘 淳^{1,2,3} 张 涌¹ 孙 静^{1,2,3}

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中国科学院红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083)

摘 要: 提出了一种高速红外视频采集系统, 重点介绍了系统关键模块——PCI-E 采集卡的设计与实现。采集卡主要基于 Kintex7 系列现场可编程逻辑门阵列(Field-Programmable Gate Array, FPGA)的硬件结构, 利用 Aurora 核与 Xilinx 7 系列 PCI-E 核成功地将高速光纤传输以及 PCI-E 技术应用于此系统。实验结果表明, 这种高速红外视频采集系统可以稳定、可靠地长时间工作, 非常适用于高帧频大面阵红外视频的实时采集、显示与存储。

关键词: 高速红外视频; 采集系统; Aurora 核; 7 系列 PCI-E 核

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2018.04.003

Design of High-speed Infrared Video Acquisition System

LIU Chun^{1,2,3}, ZHANG Yong¹, SUN Jing^{1,2,3}

(1. Shanghai Institute of Technical Physics, Shanghai 200083, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: A high-speed infrared video acquisition system is proposed. The design and implementation of a PCI-E acquisition board which is the key module of the acquisition system is mainly presented. The acquisition board is mainly based on the hardware structure of Kintex7 Field-Programmable Gate Array (FPGA). In the acquisition system, the high-speed fiber transmission and PCI-E technology are used successfully by utilizing Aurora core and Xilinx 7 series PCI-E IP core. The experimental results show that this high-speed infrared video acquisition system can operate stably and reliably for a long time. It is very suitable for the real-time acquisition, display and storage of high frame rate and large array infrared video.

Key words: high-speed infrared video; acquisition system; Aurora IP core; 7 series PCI-E IP core

收稿日期: 2018-02-28

作者简介: 刘淳(1994-), 男, 江西樟树人, 硕士研究生, 主要研究方向为高速数据传输系统设计。

E-mail: 1482916007@qq.com

0 引言

红外成像技术具有极强的抗干扰能力,可在大雾、浓烟、黑夜、伪装等极端环境下识别特定目标,并具有 24 h 全天候服务的特点,因而在国防、车载导航等众多领域应用十分广泛。随着此项技术的不断发展,人们对红外成像系统空间分辨率以及视频帧率的要求不断提高;红外图像的数据量越来越大,使得系统对图像传输和存储的实时性要求越来越高。在传统的红外图像采集系统中,探测器输出信号一般通过低压差分信号(Low-Voltage Differential Signaling, LVDS)总线传输,但 LVDS 是并行总线传输,布线难度大,且信号容易受到干扰^[1];与主机连接一般采用外设部件互连(Peripheral Component Interconnect, PCI)总线,但 PCI 总线的传输速率较慢,并不适合于高速红外图像采集^[2]。

针对以上问题,本文将速率为 5 Gbps 的 PCI-E 总线与光纤传输技术相结合,构建了一种高速红外视频采集系统。其中,PCI-E 总线既有高速数据传输能力,又有良好的外设接口,因而有利于大容量信号的实时传输;光纤传输可以有机协调视频图像与系统命令及状态信息的传输。目前,该研究已经成功地应用于一个实时红外视频采集系统,并取得了较好的效果。

1 系统总体架构

图 1 为高速红外视频采集系统的架构图。该系统采用美国 Xilinx 公司生产的 Kintex7 系列 FPGA 作为核心控制器。该系列的 FPGA 内置 PCI Express 集成模块和 GTX 高速串行收发器,可同时提供符合《PCI Express 基本规范 v2.1》的 PCI-E Gen2.0 解决方案以及高速光纤数据传输。

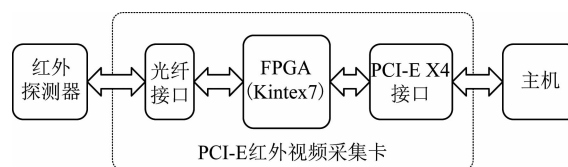


图 1 系统架构图

整个系统的数据流如下:红外探测器将采集到的图像数据经高速光纤传输给采集板;采集板对图像数据进行必要的时序控制,然后通过 Bus Master DMA 的方式将其发送给主机;主机接收到图像,并完成红外图像的实时显示和存储。同时,主机可以通过可编程输入/输出(Programmed Input/Output, PIO)的方式将命令信息发送给采集卡,也可以通过 PIO 方式获取采集板与红外探测器的状态信息;同样,采集卡可以通过高速光纤与红外探测器进行交互,从而给探测器发送命令以及获取其状态信息。图 2 为采集卡的实物图。

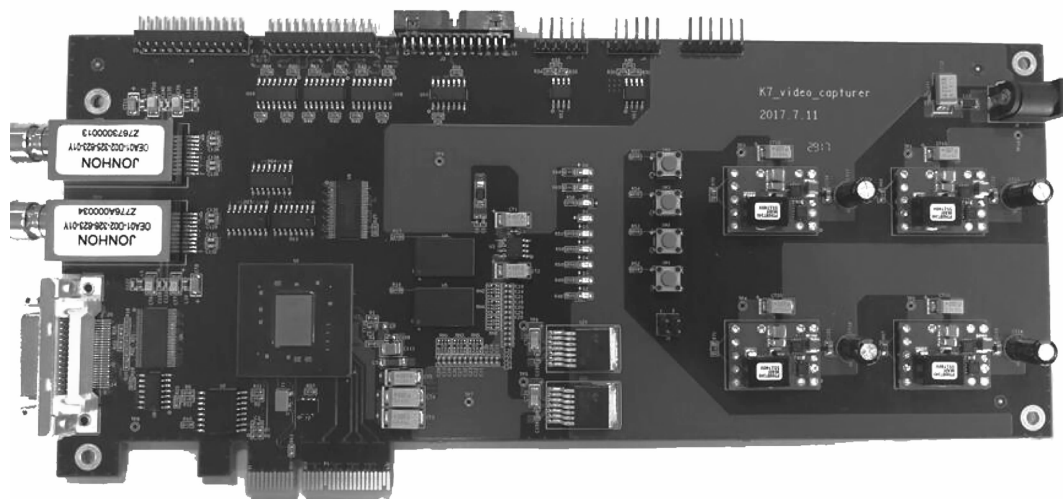


图 2 采集卡的实物图

2 采集卡的数据传输机制

2.1 光纤传输机制

光纤传输采用 Xilinx 公司提供的 Aurora IP 核^[3], 该核的系统框图如图 3 所示。可以看出, Aurora 核主要包括用户发送接口(TX User Interface)、用户接收接口(RX User Interface)、控制接口(Control Interface)和通道逻辑模块(Lane Logic)等四个部分。对于用户来说, 在配置好 Aurora 核之后, 只需设计发送、接收接口和控制接口即可。在本文设计中, 配置了 2 条线速为 1.25 Gbps 的通道, 其数据位宽为 16 bit, 工作模式为全双工帧模式。

红外图像数据通过帧模式进行传输。但是在本采集系统中, 红外探测器与采集板之间只通过一根光纤连接, 那么怎样协调两者之间的交互以及红外图像数据的传输就是一个非常重要的问题。于是本文巧妙地使用了 Aurora 核所提供的 UFC 流控制模块^[4]。帧模式下的 UFC 模块可以在正常传输数据流的过程中添加控制信息, 从而完美解决信息交互与图像数据传输的问题。

2.2 PCI-E 传输机制

PCI-E 传输选用 Xilinx 公司提供的 7 系列 FPGA 的 PCI-E 集成模块 IP 核^[5], 该核的系统框图如图 4 所示。可以看出, PCI-E 集成模块 IP 核主要包括系统接口(System Interface)、PCI-E 接口(PCI Express Interface)、配置接口(Configuration Interface)、事务接口 (AXI4-

Stream)、物理层控制和状态接口 (Physical Layer Control and Status Interface)等五个部分。当用户利用该核进行设计时, 需要将相应的系统时钟信号和系统复位信号输入到系统接口, 将配置信号连接到配置接口, 生成事务层包 (TLP)并将其连接到事务接口。7 系列 FPGA 的 PCI-E 核可进行集成模块与收发器之间的数据传输, 并通过收发器将数据发送到 PCI-E 接口, 从而可以使采集卡通过 PCI-E 通道与 PC 机进行数据交互。

在本文设计中, 将 7 系列 FPGA 的 PCI-E 核作为端点设备 (Endpoint Device), 配置了 4 条线速为 5 Gbps 的通道, 并采用了 MSI 中断模式。

3 FPGA 逻辑设计

作为高速红外视频采集系统的核心控制器, FPGA 需要完成从红外探测器获取数据并将其发送给主机的任务。因此, FPGA 内部逻辑设计的优劣直接决定着采集系统的性能。图 5 为 FPGA 内部的逻辑设计框图。

FPGA 逻辑设计主要分为两个部分: 一个是红外图像数据的传输部分; 另一个是控制命令与状态信息的传输部分。

在图像数据的传输过程中, 采集卡与主机之间利用 PCI-E 通过基于总线主控 DMA (Bus Master DMA)的方式进行图像数据传输。为了使主机能对采集卡进行一些必要的控制, 需要在 FPGA 内部分配一定大小的 RAM 资源 (设

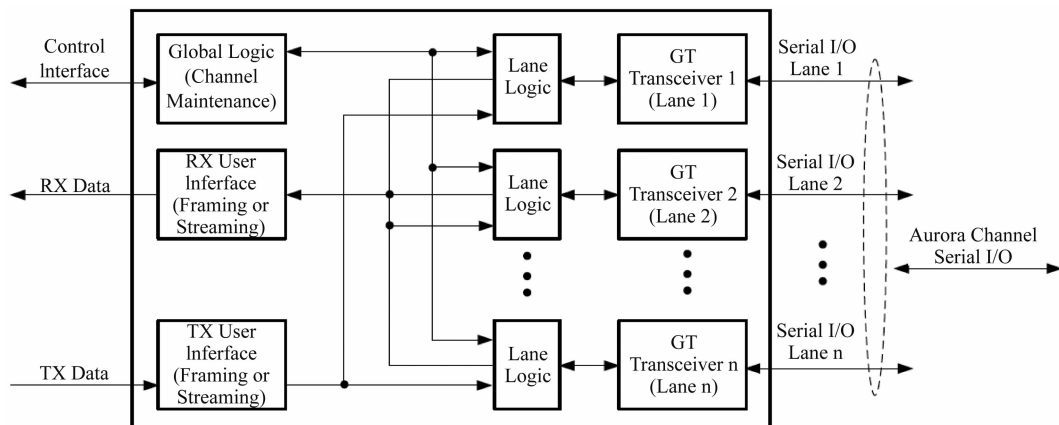


图 3 Aurora 核的系统框图

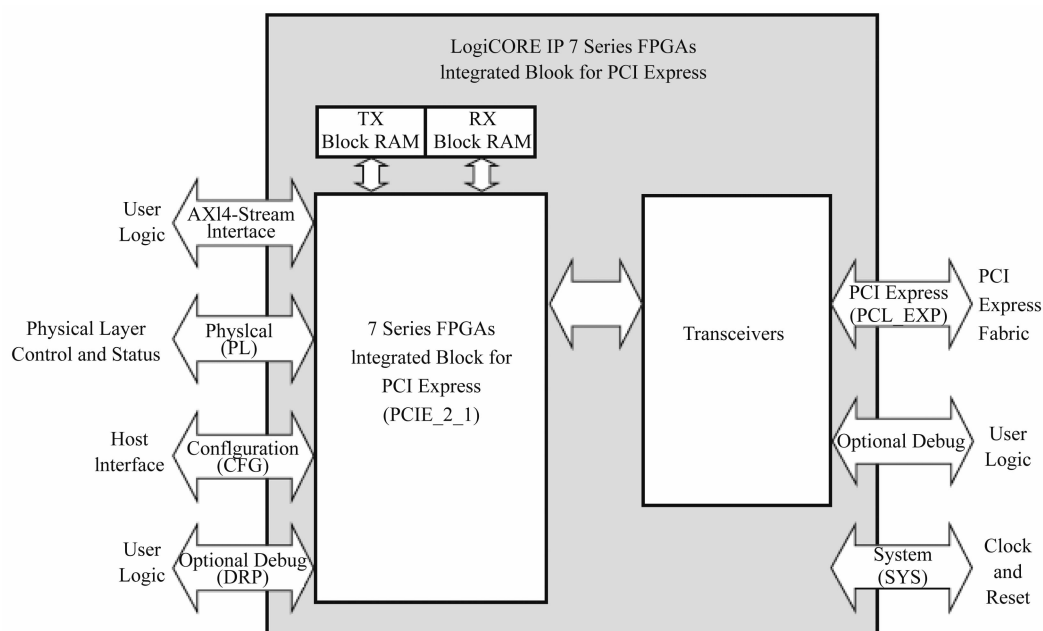


图 4 7 系列 FPGA PCI-E 集成模型 IP 的系统框图

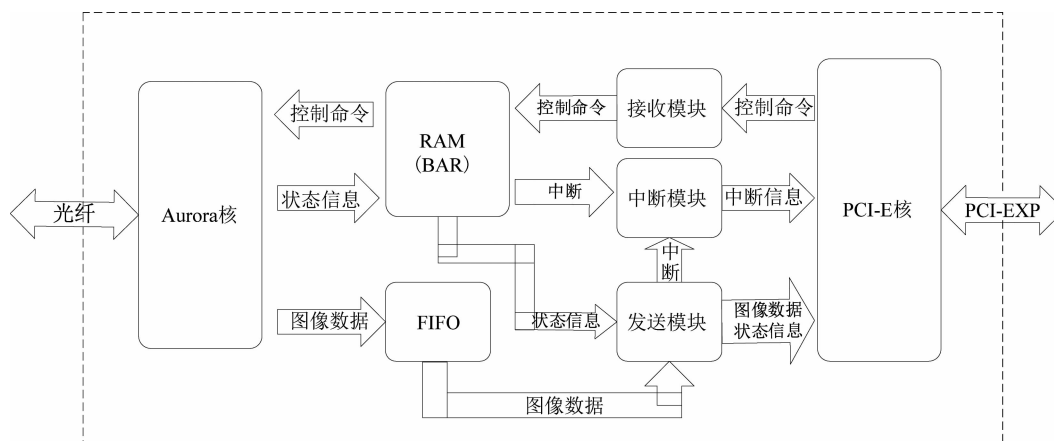


图 5 FPGA 内部的逻辑设计框图

计中为 2 kB)用作控制寄存器,并通过 PCI-E 配置空间基址寄存器(BAR)。该 RAM 在采集卡插入系统中会被映射到主机的内存空间。于是主机只需访问映射好的内存空间即可通过 PIO 的方式访问 FPGA 内部的控制寄存器。当开始采集数据时, FPGA 首先通过 PIO 接收 DMA 控制命令以及目的地址。当主机允许采集时,开始接收 Aurora 核所获取的图像数据,并将数据根据红外探测器采集图像的格式按照时序放入 FIFO 中。当 FIFO 中有一定的数据量(设计中为 256 Byte)时,发送模块开始

向目的地址 1 发起 DMA 传输;传输达到指定数据量(设计中为一帧图像)后,通知中断模块向主机发送中断指令;主机收到中断指令后,存储并显示这一帧图像。此时,发送模块将接收到的下一帧图像向目的地址 2 传输……如此执行乒乓操作。当主机命令停止采集时,发送模块不再接收图像数据,采集工作终止。

在传输控制命令与状态信息时,首先介绍控制命令的传输流程。控制命令分为以下两种:第一种是主机发送给采集卡的 DMA 相关命令,第二种是主机发给红外探测器的相关命

令。对于这两种控制命令,主机都是通过 PIO 的方式将命令信息写到相应的 BAR 空间(FPGA 里的 RAM)。当收到第一种命令时,采集卡开始进行相应的 DMA 操作。当收到第二种命令时,采集卡将命令信息发送至 Aurora 核 UFC 模块的相应端口,然后通过帧模式下的 UFC 模块将命令信息发送给红外探测器。状态信息也分为两种:第一种是采集卡的状态信息,第二种是红外探测器的状态信息。主机可以通过 PIO 的方式直接查询和获取采集卡的状态信息。而对于红外探测器的状态信息,首先用 FPGA 通过 Aurora 核的 UFC 模块接收到探测器的状态信息,然后将其放入指定的 RAM 里(BAR 空间),接着给主机发送收到探测器状态中断的指令;主机收到相应中断指令后,通过 PIO 模式读取相应状态,从而完成状态信息的传输。

4 主机软件设计

主机软件设计分为两个部分:第一部分是 PCI-E 设备的驱动程序,第二部分是显示、存储、控制界面的应用程序。其中,驱动程序采用 WinDriver 软件设计,主要用于实现硬件的初始化以及应用程序与 PCI-E 采集卡之间的通信;应用程序基于 VS2010 设计完成,主要用于实现人机交互功能,可通过界面发送控制命令,查询板卡及探测器状态,开启或者关闭 DMA 传输功能,并实时显示所采集的图像。

整个软件的功能流程如下:

(1)开启软件,驱动程序进行初始化。首先访问 PCI-E 采集卡的配置空间,将 PCI-E 采集卡的基址寄存器(BAR)映射到主机内存,并开启中断。

(2)应用程序给 PCI-E 采集卡发送初始化控制命令,同时驱动程序在内存中申请两段连续的物理内存,用于缓存接收到的红外图像,并将这两段物理内存的首地址分别写入到 PCI-E 采集卡的相应寄存器中。

(3)当用户在应用程序中设置开始图像传输时,应用程序将开始传输命令发送给驱动程序;驱动程序就会写入 PCI-E 采集卡中的图

像传输控制寄存器,采集卡开始将图像 DMA 传输到步骤(2)所申请的物理内存中。

(4)当采集卡传输完一帧图像后,向驱动程序发送 MSI 中断指令,并自动开始传输下一帧图像。驱动程序收到中断指令后,通知应用程序;应用程序就会去相应的内存段中取出图像加以显示并将其存储到硬盘内。

(5)当用户在应用程序中设置停止图像传输时,应用程序将停止传输命令发送给驱动程序;驱动程序就会写入 PCI-E 采集卡中的图像传输控制寄存器,采集卡停止 DMA 传输。

(6)用户可以随时在应用程序中设置发送红外探测器的控制命令。驱动程序将其写到 PCI-E 相应的控制寄存器中,完成控制命令的传输。

(7)当收到状态信息中断指令时,驱动程序读取 PCI-E 采集卡中相应的状态信息寄存器,并将数据传递至应用程序的操作界面,以供用户查阅。

(8)退出程序时,首先停止图像的 DMA 传输,然后注销所申请的内存段,并关闭中断。

5 实验方法及结果

本文提出的高速红外视频采集系统采用某型号的红外面阵探测器。该探测器可以采集 640×512 像素红外图像,每个像素为 16 bit 位宽,其中 14 bit 为有效数据,帧频为 100 帧/秒。测试结果表明,本文设计的 PCI-E 高速红外采集卡满足整个红外采集系统的要求,可以连续、稳定地工作。其中,红外视频传输稳定,没有出现丢帧现象;控制命令和状态信息的发送与接收准确、及时。经计算可知,整个系统的红外视频数据传输速率为 62.5 MB/s。图 6 为该系统所采集到的实景图像。

在测试本系统中高速光纤传输的极限速率时,由于受探测器帧频的限制,无法传输实际采集的红外图像。为了便于测试,本文采用了一块用于提高输出图像帧频的模拟探测器输出板。经实测发现,当图像帧频为 200 帧以下时,光纤传输稳定可靠;当超过 200 帧时,会有偶发性的丢帧现象出现。因此,在本文设计



图 6 实景图像

中, 光纤传输的极限速率为 125 MB/s, 计算光纤传输的理论带宽为 160 MB/s, 光纤的实际极限传输速率为理论带宽的 78%。Aurora 核采用的 8B/10B 编码是影响传输效率的主要因素。在未来的应用中, 可通过提高光纤的线速(最高可配置为 3.25 Gbps)来适配面阵更大、帧频更高的红外探测器。同时, 本文设计也可通过扩展光纤通道来获取多个红外探测器的视频数据, 从而实现极佳的可扩展性。

为测试本系统中 PCI-E 的传输极限速率, 我们在采集卡的 FPGA 中例化一个 ROM, 将一帧 640×512 大小的红外图像数据放入 ROM 中, 然后开始通过 PCI-E 循环传输这一帧图像。实测结果表明, 传输帧频可达到 1300 帧/秒, 极限速率为 812.5 MB/s。计算 PCI-E gen2 x4 的单向理论带宽为 1280 MB/s, 实际极限传输速率为理论带宽的 63%。本文采用的 8B/10B 编码影响了 PCI-E 传输效率。在未来的应用中, 可以通过增加通道来获得更快的传输速率。

表 1 列出了三种高速红外图像采集系统的传输速率数据。其中, 系统 1 为赵佳等人^[2]设计的基于 Xilinx PCI LogiCore 的高速红外图像采集与实时显示系统, 实测 PCI 接口的最大传输速率为 240 MB/s。系统 2 为兰春嘉等人^[1]设计的基于 PCI Express 的高速红外图像采集系统, 实测 PCI-E x1 接口的最大传输速

率为 131 MB/s。而系统 3 则为本文设计的高速红外视频采集系统, 其 PCI-E x4 接口的最大传输速率高达 812.5 MB/s。可以看出, 本文极大地提升了已有红外视频采集系统的采集速率, 因而在未来的使用中具有可扩展性强、实用价值突出的优势。

表 1 三种红外图像采集系统的传输速率

系统	最大采集速率
系统 1	240 MB/s
系统 2	131 MB/s
系统 3	812.5 MB/s

6 结束语

本文设计的高速红外视频采集系统采用自行设计的 PCI-E 红外视频采集卡。该采集卡选用 Kintex7 160T FPGA 作为主控器, 结合 Xilinx 公司提供的 Aurora 软核, 成功实现了红外图像的高速光纤传输以及红外探测器与采集卡的稳定通信; 结合 Xilinx 公司提供的 7 系列 PCI-E 硬核, 成功实现了高速红外视频的 DMA 传输。随着大面阵高速红外探测器应用领域的不断拓展, 本文设计将会具有更加广泛的应用前景。

参考文献

- [1] 兰春嘉, 汤心溢, 王世勇, 等. 基于 PCI Express 的高速红外图像采集系统 [J]. 红外技术, 2011, 33(1): 37-40.
- [2] 赵佳, 张涌, 汤心溢. 基于 Xilinx PCI LogiCore 的高速红外图像采集及实时显示系统 [J]. 红外技术, 2009, 31(5): 252-255.
- [3] Xilinx Inc. Aurora 8B/10B v11.0 Product Guide [EB/OL]. [2017-11-05]. <http://www.xilinx.com/support>.
- [4] 张承泓, 李范鸣. 大面阵红外图像高速传输系统设计 [J]. 红外技术, 2014, 36(12): 958-960.
- [5] Xilinx Inc. 7 Series FPGAs Integrated Block for PCI Express v3.3 Product Guide [EB/OL]. [2017-12-04]. <http://www.xilinx.com/support>.