

文章编号:1007-2780(2016)02-0208-07

基于 TDICCD 空间相机图像模拟源系统设计

张 敏^{1,2*}, 金龙旭¹, 李国宁¹, 武奕楠¹, 张然峰¹, 韩双丽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. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:空间相机地面检测系统在投入使用之前,必须进行严格的自检功能测试。为了解决测试时与庞大的 CCD 相机系统对接造成的时间和物力资源浪费问题,本文结合 TDICCD 空间相机工作原理,设计了一种空间相机图像模拟源系统。本系统通过 USB 总线进行图像数据的下传,然后经 SRAM 缓存,并以流水线作业方式下载到 FLASH 中实现 8 通道图像数据的固存。并且可实现对相机行频大小、图像大小进行调整的功能,进而模拟不同型号空间相机。实验结果表明,该图像模拟源 USB 接口的下载速度可达到 40 MB/s,空间相机地面检测系统显示的图像与上位机发送的图像一致,无数据丢失和误码的情况。该相机图像模拟源设计灵活,性能稳定可靠,适用范围广。

关键词:图像模拟源;USB;FLASH;流水线操作

中图分类号:TN431.2;TP391 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20163102.0208

Design of image simulation system of TDICCD space camera

ZHANG Min^{1,2*}, JIN Long-xu, LI Guo-ning¹, WU Yi-nan, ZHANG Ran-feng¹, HAN Shuang-li¹(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,*
*Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: Space camera ground detection system before being put into service must be carried out self-test function testing strictly. In order to solve the problem of waste of time and resources when testing with the massive CCD camera system, we design a kind of space camera image simulation system based on the working principle of TDICCD space camera. The system obtained the image data through USB bus interface. The image data transfer through the SRAM cache. To realize the permanent storage, the image data are stored in FLASH. This system may realize the change of camera line frequency and image size, so it can simulate different models of space camera. The experimental results show that the speed of data download comes to 40 MB/s from USB interface, and the image display by the space camera ground detection system is consistent with the original image sent by the host computer, without loss of data and error conditions. The camera image simulation system is flexible, stable and reliable performance, wide application range.

Key words: image simulation system; USB; FLASH; assembly line

收稿日期:2015-04-15;修订日期:2015-06-04.

基金项目:吉林省科技发展计划资助项目(No. 20130522107JH)

Supported by Scientific and Technological Developing Program of Jilin Province(No. 20130522107JH)

* 通信联系人, E-mail: ciompzhangmin@163.com

1 引 言

空间相机在研制过程中,对相机的原理实现和功能验证是必不可少的环节。随着空间技术的迅猛发展,空间相机数传速率不断提高、数据量不断增大,这对相机地面检测处理系统的实时接收、存储、显示都提出了更高的要求。相机地面检测处理系统在投入使用之前,必须进行严格自检功能的测试。而在测试时,相机地面检测处理系统需要与庞大的 CCD 相机系统进行对接,这样会造成大量时间和物力的浪费,给工作人员带来不必要麻烦^[1-3]。为了解决上述问题,本文结合空间相机的工作特点以及相机输出图像格式,设计了空间相机图像模拟源系统。该系统可以模拟空间相机原始图像数据输出格式,向地面检测处理系统存储单元发送 CCD 的 P 通道和 B 通道测试数据,检测系统各单元功能,实现相机地面系统自检功能。通过 RS-422 总线传送参数和命令,调节图像模拟源的输出行频范围,图像大小,为空间相机地面检测系统的自检提供了灵活性与便利。由于单片的 FLASH 实际接口速度低,不能满足本系统要求,所以本文采用 16 片 flash 组成存储阵列对 40 MB/s 的高速数据进行存储,并且满足了更大容量的存储要求。本文对空间相机图像模拟源系统组成以及设计方案进行了详细的阐述。

2 系统组成与设计方案

2.1 相机输出的数据格式

空间 TDICCD 相机使用的是线阵 CCD,采用推扫成像模式,所以 CCD 输出的图像格式是以行

为单位实时输出的^[4-6]。每一片 CCD 输出的数据包括 4 通道 P 波段图像数据和 4 通道 B 波段图像数据。每行数据由 12 288 个有效像素数据和 42 个辅助数据组成,图像的量化位数为 12 bit。通过调节消隐时间的大小,可以改变 CCD 输出的行频范围^[7]。4 个通道 P 波段图像数据格式如图 1 所示。

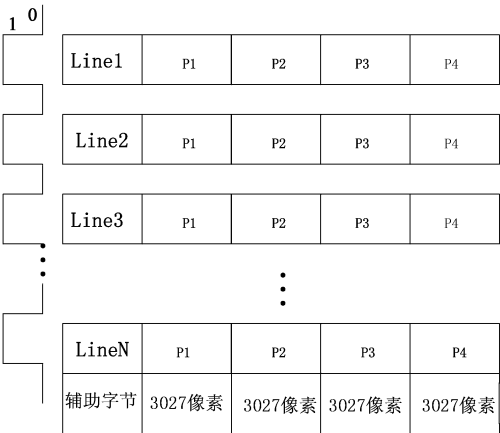


图 1 空间相机输出图像格式
Fig. 1 Image format for space camera

2.2 系统组成

本系统主要由 USB 接口模块、FLASH 图像数据固存阵列模块,图像数据发送端口模块,SRAM 缓存模块,相机行频、时间大小调整模块组成。全色通道(P1,P2,P3,P4)和多光谱通道(B1,B2,B3,B4)的图像数据采用流水线的作业方式存储到 FLASH 存储阵列中。上位机服务器向相机图像模拟源注入各种测试图像和相应参数,图像模拟源模拟 CCD 成像单元输出的图像格式,通过图像数据发送端口发送给地面图像处理系统。系统组成框图如图 2 所示。

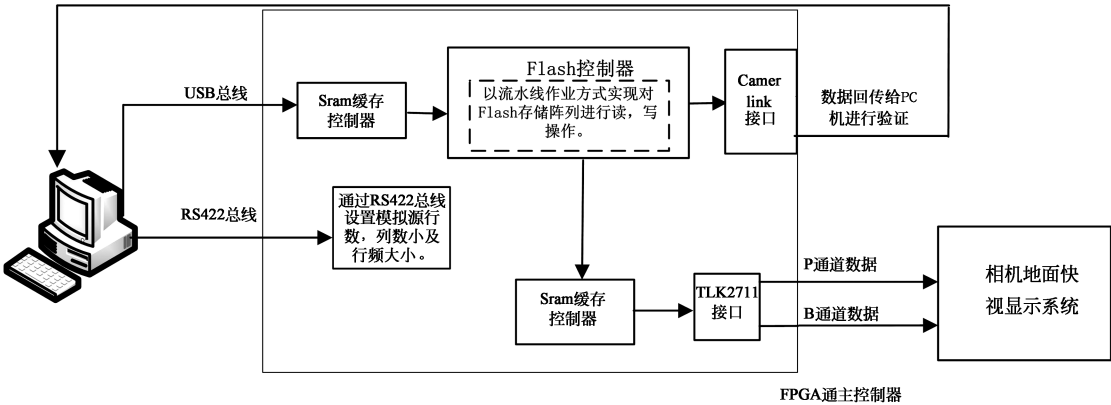


图 2 图像模拟源系统组成
Fig. 2 Composition of the image simulation system

USB 接口模块负责完成硬件系统与上位机之间的图像数据传输。USB2.0 接口芯片选择 CYPRESS 公司的 CY7C68013A,其集成智能串行接口引擎(SIE)^[8]。为了实现掉电后图像测试数据不丢失,从上位机传输的图像数据必须下载到 FLASH 中进行固存。在每次需要输出图像时,直接从 FLASH 中读取数据,然后缓存到高速 SRAM 中,在 SRAM 中构造成所需要的图像格式,进行不间断循环传输。为了提高存储速度,16 块 FLASH 组成大容量高速存储阵列,每个通道由 2 片 FLASH 存储,16 片 FLASH 以流水作业方式进行图像数据的存储。

为了匹配 USB 接口与 FLASH 接口速度,采用 SRAM 作为中间缓存介质。数据发送接口模块由 Cameralink 接口和高速串行 Gbps 接口组成,Cameralink 接口主要用于图像数据回传给上位机,以此验证图像数据传输是否正确。高速串行 Gbps 接口芯片采用 TI 公司的 Gbit 串行收发器 TLK2711。它是一个从 1.6 Gbps 到 2.7 Gbps 高速串化/解串器,主要完成数据的高速并串和串并转化功能。在发送端接口模块,每片 TLK2711 的并行发送时钟频率为 88 MHz,每个通道 P 波段像元时钟是 22 MHz,每个通道 B 波段像元时钟是 5.5 MHz。从 FLASH 中读取的数据不能直接构造成相机数据格式,所以每个波段需要 4 片 SRAM 作为相机数据格式的构造装置。在 SRAM 中缓存一行图像数据(P1,P2,P3,P4),构成相机的数据格式,然后通过 TLK2711 发送给地面图像处理系统。

3 系统工作原理

3.1 USB 接口电路设计

USB 数据传输接口设计主要包括以下 4 点:(1)USB 固件程序设计;(2)设备驱动程序设计;(3)上位机应用程序设计;(4)FPGA 控制程序设计。固件程序负责初始化单元,重新设置设备。USB 的固件程序采用 CYPRESS 公司的固件程序框架,在此基础上进行改动,大大简化了编程的难度,实现本系统的功能。USB 设计固件程序时,采用同步 SLAVE FIFO 从属模式,设置 EP2 为 out 端点,EP6 为 in 端点,EP2 与 EP6 都配置成 512 字节,4 重缓冲区。固件代码使用 Keil

C51 uVision2 软件编写,代码存储在主机中,设备加电后由驱动程序把固件代码下载到片内 RAM 后执行,即“重新列举”,这种方式便于系统调试与升级。USB 的驱动程序使用芯片公司提供的通用设备驱动程序,已经满足本系统的设计要求。

上位机应用程序是系统与用户的接口,它通过通用驱动程序完成对外设的控制和通信。主机端的应用程序负责向 FX2 的 FIFO 发送大量数据,使用 VC++6.0 进行开发,在编写主机应用程序时,只需调用相应的 WIN32 API 函数向驱动程序提交各种申请,就能由驱动程序来完成相应的读、写数据等功能。上位机应用程序通过 USB 总线接口注入模拟源图像数据,包括 2 个波段(P 波段和 B 波段),每个波段注入的图像数据为每行 3 072 个像元×行数,图像位数为 12 位。上位机通过多次循环向 USB 端口发送数据,直到一幅图像传输完毕。USB 接口芯片以 512 字节为单位打包连续不间断地把数据传输给 FPGA。

USB 接口芯片与 FPGA 的接口方式如图 3 所示。IFCLK 为接口时钟,可由芯片内部产生(30MHZ/48MHZ),也可由外部输入(5~48MHZ)。通过设置 IFCFG 寄存器,本系统采用芯片内部产生 30M 时钟。USB 接口芯片的传输端点具有量子 FIFO 结构,8051 可不参与数据高速传输,USB 接口和外围电路直接共享 FIFO 存储器。FLAGA~FLAGD 为 FIFO 的标志引脚,用于标志 FIFO 当前的空满状态。FD[15:0]为 16 位数据总线。FIFOADR[1:0]用于选择哪个端点从 FD 数据总线上输出。SLOE 用于使能数据总线 FD 的输出。FIFO 指针在 IFCLK 的上升

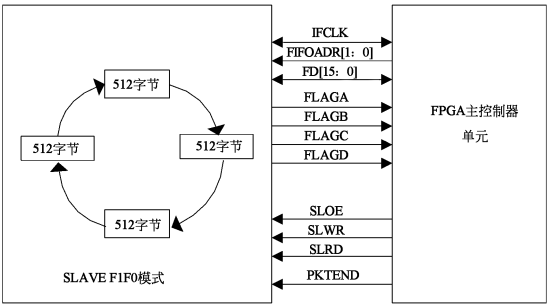


图 3 FPGA 与 USB 接口电路连接

Fig. 3 Connection of the FPGA and USB interface circuit

沿进行更新,在写入模式下,触发 SLWR 后, FIFO 数据总线上的数据会在 IFCLK 的每个上升沿写入到 FIFO 中。在读状态下,触发 SLRD 后,数据开始从新寻址的位置向数据总线传输。无论是在读状态还是在写状态下,都要保持 SLOE 处于触发状态。PKTEND 则是外部信号终端数据包,以满足传输短数据包。

3.2 FLASH 阵列流水线存储技术

FLASH 芯片采用三星公司的 NAND 型 FLASH(K9K8G08U0A),该芯片单片存储容量为 8 Gbits,每页(page)由 2 048 字节主存储区和 64 字节的空闲区域组成,64 字节的空闲区域用于存放坏块标记。64 页(page)组成一块(block),器件共有 8 192 块。芯片内包含一个 2 048 字节的页寄存器,在对 FLASH 进行读写的过程中,首先将存储介质中数据或者外部数据缓存到页寄存器中,然后再对页寄存器进行读写操作。所以 FLASH 芯片存在页编程时间和页读出时间。一页的典型编程时间为 200 μ s,最大编程时间为 700 μ s。存储的数据从存储介质到寄存器(register)的读出时间最大为 20 μ s^[9-10]。

由器件本身性质所决定,FLASH 写入一页数据需要两个步骤(1)页寄存器加载操作,页寄存器的加载包括命令、地址、数据的加载。写时钟周期(write cycle time)最小为 25 ns,它的最大写入速率为 40 MHz。如按照最大写入速率计

算,写入一页数据的加载时间总共为 102.5 μ s。(2)页编程操作,当页寄存器数据加载完成后,芯片自动将寄存器中的数据写入到内部存储介质中,页典型编程时间为 200 μ s,最大编程时间为 700 μ s。只有编程操作结束后才能进行下一页的写入操作,可以看出页编程时间较长,是影响数据存储速度的关键因素^[11-12]。本系统针对上述 FLASH 特点,采用 8 级流水线写操作,即对一组 FLASH 进行编程的期间对另一组 FLASH 进行寄存器加载操作。这样整体上缩短了页编程时间,从而使 FLASH 阵列的存储速度得到提高。图像的量化位数为 12 bit,而 FLASH 的数据线宽度为 8 位。为了进一步提高存储的速度,两片 FLASH 并行实现一个通道图像数据的存储,其中一片 FLASH 存储图像数据的高 8 位,另一片 FLASH 存储图像数据的低 4 位。由此可得 8 级流水线操作示意图,如图 4 所示。

一共有 8 组 FLASH,每组 FLASH 由 2 片组成,第一组存储 P1,第二组存储 P2,第三组存储 P3,以此类推下去,8 组 FLASH 分别存储 8 个通道的图像数据。上位机应用程序向 USB 芯片的端点 FIFO 发送图像数据顺序如图 4 所示,先是 P 波段 4 个通道图像数据、B 波段 4 个通道图像数据的第一像元,然后再是 P 波段、B 波段第二像元。FLASH 的写入速度为最高 40 MHz,而 FLASH

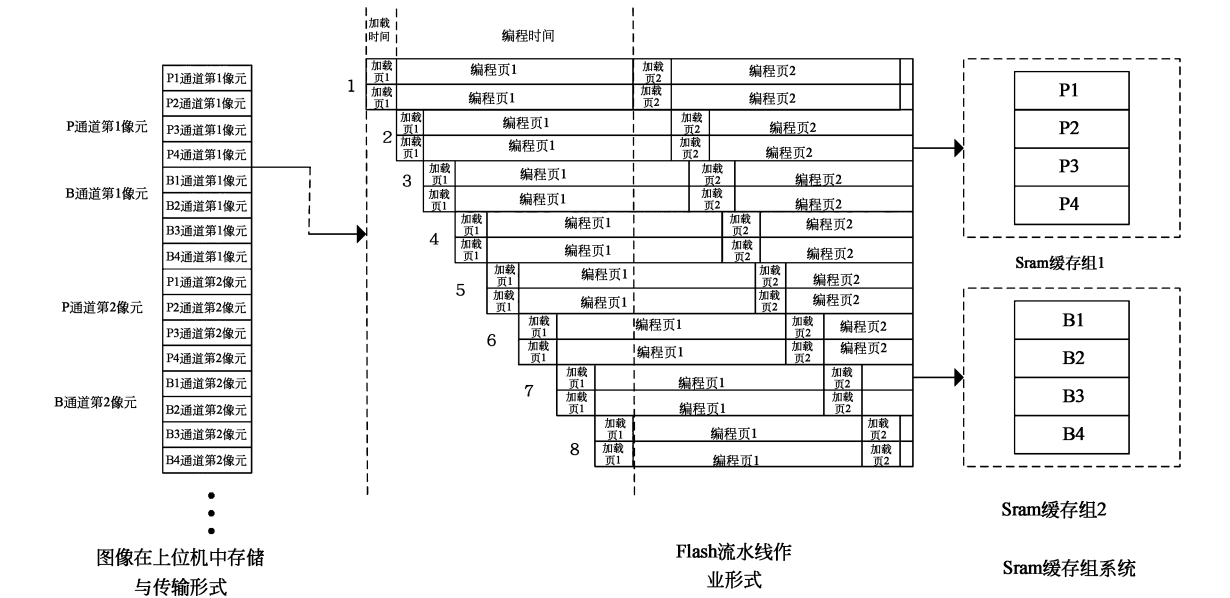


图 4 FLASH 流水线操作流程

Fig. 4 Flow of the FLASH assembly line operation

4.2 图像测试

为了验证本系统的应用范围广泛以及性能稳定。通过 FPGA 编程调节图像模拟源的行频范围,调整图像的发送时钟,并且通过上位机发送各种测试图像。从上位机通过 USB 接口传输一幅测试自校图形如图 7(a),固存到 FLASH 中,然后通过 Cameralink 回传到 PC 机上进行显示,得到的结果如图 7(b)所示。可以看出,上位机存储的原始图像和经 Cameralink 显示的图像一致,无数据丢失和误码的情况。



(a)上位机存储的原始图像

(a)Original image storage in the PC



(b)经 Cameralink 接口显示的图像

(b)Image display through cameralink interface

图7 原始图像以及经 Cameralink 接口显示的图像

Fig.7 Original image and the image display through cameralink interface

对原始图像和显示的图像数码值进行比较,计算方法借鉴数学上衡量保真度的均方根误差公式:

$$e_{\text{rms}} = \sqrt{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N (p(x,y) - q(x,y))^2 / (MN)}, \quad (1)$$

其中: $p(x,y)$ 为图 7(a) 数码值, $q(x,y)$ 为图 7(b) 数码值, M 为图像行数, N 为图像列数。由式(1)算得图像的均方根误差 $e_{\text{rms}} = 0$, 可见空间相机图像模拟源可以稳定可靠的工作。

5 结 论

本文设计的空间相机图像模拟源系统,已经成功地应用到某型号的空间 TDICCD 相机上。利用 USB 接口芯片从上位机进行图像数据的下载,采用了 16 片 FLASH 以流水线作业方式对图像数据进行固存,从而大大提高了整个存储系统的存储速度。流水线操作技术的存储速度将是单片 FLASH 存储速度的 8 倍,使得 FLASH 的接口存储速率达到 40 MB/s。USB 的实际下载速度可以达到 40 MB/s,而本文的流水线操作技术正好满足了 USB 的下载速度。最后利用 TLK2711 把数据发送给地面快视显示系统。该系统性能稳定,应用灵活便利。对空间相机地面自检功能的实现具有一定的设计参考价值。

参 考 文 献:

- [1] 鲁琴,杜列波,魏鹏. 基于 FPGA 的卫星图像模拟源系统设计[J]. 测试技术学报, 2009, 23(3): 261-265.
LU Q, DU L B, WEI P. Design of simulative satellite image resource system based on FPGA[J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2009, 23(3): 261-265. (in Chinese)
- [2] 朱鹏,金龙旭,李国宁,等. 空间相机图像压缩模拟源的设计与实现[J]. 液晶与显示, 2012, 27(4): 563-568.
ZHU P, JIN L X, LI G N, et al. Design and realization of simulative image compression resource system of space camera[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2012, 27(4): 563-568. (in Chinese)
- [3] 张贵祥,金光. 星载光学遥感相机图像模拟源的设计与实现[J]. 计算机测量与控制, 2009, 17(7): 1368-1374.
ZHANG G X, JIN G. Design and realization of image simulator of space vehicle borne optical remote sensing camera [J]. *Computer Measurement & Control*, 2009, 17(7): 1368-1374. (in Chinese)
- [4] 李进,金龙旭,李国宁,等. SDRAM 在大视场 TDICCD 空间相机中的应用[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(5): 1246-1251.
LI J, JIN L X, LI G N, et al. Application of SDRAM to the large field of view TDICCD space camera[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(5): 1246-1251. (in Chinese)
- [5] 夏巧桥,汪鼎文,张立国,等. 高速多通道遥感相机快视系统的实现[J]. 光学精密工程, 2013, 21(1): 158-166.
XIA Q Q, WANG D W, ZHANG L G, et al. Realization of fast-view system for high-speed multi-channel remote

- sensing camera[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(1): 158-166. (in Chinese)
- [6] 冷雪, 张雪菲, 李文明, 等. 全帧 CCD 相机时间延迟积分模式下的图像缺损[J]. 光学精密工程, 2014, 22(2): 467-473.
- LENG X, ZHANG X F, LI W M, *et al.* Image defect of full-frame CCD in TDI mode[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(2): 467-473. (in Chinese)
- [7] 杨金宝, 李飞, 郝军伟. 基于视频行场消隐期的大容量 FLASH 存储控制器[J]. 光学精密工程, 2015, 23(4): 1153-1160.
- YANG J B, LI F, QIE J W. Large capacity FLASH video storage controller based on blanking period of line and field signals[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(4): 1153-1160. (in Chinese)
- [8] 安荣, 任勇峰, 李圣昆. 基于 FPGA 和 USB2.0 的数据采集系统[J]. 仪表技术与传感器, 2009(3): 49-51.
- AN R, REN Y F, LI S K. Data sampling system based on FPGA and USB2.0[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2009(3): 49-51. (in Chinese)
- [9] 余辉龙, 何昕, 魏仲慧, 等. 应用 NAND 型闪存的高速大容量图像存储器[J]. 光学精密工程, 2009, 17(10), 2548-2554.
- YU H L, HE X, WEI Z H, *et al.* High speed and high capacity image recorder based on NAND flash[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(10), 2548-2554. (in Chinese)
- [10] 李进, 金龙旭, 韩双丽, 等. 空间图像存储器 NAND Flash 的可靠性[J]. 光学精密工程, 2012, 20(5): 1090-1101.
- LI J, JIN L X, HAN S L, *et al.* Reliability of space image recorder based on NAND flash memory[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(5): 1090-1101. (in Chinese)
- [11] 朱知博. 基于 NAND FLASH 的高速大容量存储系统设计[J]. 现代电子技术, 2011, 34(8): 170-173.
- ZHU Z B. Design of high-speed and mass storage system based on NAND flash[J]. *Modern Electronics Technique*, 2011, 34(8): 170-173. (in Chinese)
- [12] 张欣, 刘朝晖, 刘文, 等. 基于闪存的高速大容量存储系统设计[J]. 微电子学与计算机, 2010, 27(11): 173-176.
- ZHANG X, LIU Z H, LIU W, *et al.* Design of a storage system base on flash with high speed and huge capacity [J]. *Microelectronics & Computer*, 2010, 27(11): 173-176. (in Chinese)

作者简介: 张敏(1990—), 女, 吉林长春人, 博士研究生, 主要从事空间相机电子学以及图像处理。E-mail: ciompzhangmin@163.com