

文章编号 1004-924X(2024)21-3166-08

pnCCD 的实时 X 射线成像数据采集系统

霍 嘉, 赵晓帆, 崔苇苇, 王于仁, 王 昊, 陈 勇*

(中国科学院 高能物理研究所, 北京 100049)

摘要: 根据 pnCCD 的工作特点, 采用多线程处理和多帧图像叠合技术, 研制了基于 pnCCD 的实时 X 射线成像数据采集系统。为了满足高速数据实时采集与缓存的需求, 硬件采用 DDR3 存储器接收缓存探测器机箱的科学数据。上位机软件采用 LabVIEW 的队列操作函数实现了数据采集、存储、多帧叠合成像的多线程处理, 并设计了多模式下的实时图像处理模块。测试结果表明, 该数据采集系统满足 pnCCD 各工作模式下的数据采集, 实时的图像处理快速呈现了聚焦相机成像的位置信息, 加快完成在 X 射线标定装置中聚焦相机对轴对焦等实验过程。数据采集系统通信稳定可靠, 具有很好的灵活性和可移植性。

关键词: X 射线成像; pn 结电荷耦合器件 (pnCCD); 数据采集; LabVIEW

中图分类号: TN386.5; TP274.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20243221.3166

Real-time X-ray imaging data acquisition system for pnCCD

HUO Jia, ZHAO Xiaofan, CUI Weiwei, WANG Yusa, WANG Hao, CHEN Yong*

(Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding author, E-mail: ychen@ihep.ac.cn

Abstract: A real-time imaging data acquisition (DAQ) system for pn-junction Charge-Coupled Devices (pnCCD) was developed, incorporating multi-thread processing and multi-frame image superposition techniques to address the specific operational characteristics of pnCCDs. To fulfill the high-speed DAQ requirements for real-time data acquisition and caching, DDR3 memory was employed to receive scientific data from the detector box. The host computer utilized the queue operations functionality of LabVIEW to implement multi-threaded processing for data acquisition, storage, and image superposition. Additionally, real-time image processing modules with multiple operational modes were designed. Experimental results demonstrated that the DAQ system effectively met the requirements across various pnCCD operational modes. Real-time image processing enabled rapid determination of the focusing camera's imaging position, facilitating efficient completion of key experimental procedures, such as focus adjustment and positive axis determination, within the X-ray calibration facility. The system exhibited stable and reliable communication, showcasing exceptional flexibility and portability.

Key words: X-ray imaging; pnCCD; data acquisition; LabVIEW

收稿日期: 2024-06-17; 修订日期: 2024-07-15.

基金项目: 深空基准建设装置 (No. 42327802); 中国科学院空间科学战略先导科技专项 (No. XDA15310103)

1 引 言

爱因斯坦探针(Einstein Probe, EP)是面向时域天文学和高能天体物理的X射线天文卫星,后随X射线望远镜(Follow-up X-ray Telescope, FXT)是其上的一个重要有效载荷^[1-2]。FXT载荷的聚焦相机采用Wolter-I型聚焦镜结构,可在第一时间对触发源进行深度后随观测,还可以对天体进行定点观测。其探测器选用德国马普地外物理研究所半导体实验室研制的pnCCD(pn-junction Charge-Coupled Device, pnCCD),此探测器是目前国际上读出速度最快的X射线CCD。FXT的pnCCD通常以20 Hz的帧率运行,与eROSITA望远镜pnCCD使用的帧率相同。

在FXT的研制过程中,需要对探测器模块的输出数据进行成像处理,如聚焦镜的点扩展函数(Point Spread Function, PSF)测试、聚焦镜的对准调试等,因此,成像数据采集成为整个系统联调测试中的关键环节。成像数据采集系统的实时成像功能可以快速查看聚焦相机成像的位置信息,加快标定实验进程。当前X射线成像技术已广泛应用于无损检测、安检、医学成像等领域,经历了从胶片成像到直接数字化X射线成像(Digital Radiography, DR)的发展历程。DR具有高分辨率、大信息存储量和实时性等特点,是目前应用最广泛的X射线成像技术^[3]。

X射线探测器是一种将X射线位置及能量信息转换成可记录的数字信号的装置,按成像器件不同,又分为像增强器、线阵探测器及面阵探测器等。FXT选用的探测器是专门为X射线空间天文观测研制的焦平面探测器pnCCD,并且探测器模块的输出数据格式是自定义的。因此,常用X射线数据采集系统不适用于FXT聚焦相机的数据采集和成像,需要研制专用的成像数据采集系统。由于不同测试模式下探测器机箱LVDS(Low Voltage Differential Signaling)接口时钟的发送频率不同,所研制的数据采集系统也需满足不同LVDS时钟发送频率下的数据采集。为了同时满足高速数据采集、缓存与多帧叠合实时成像的系统需求,采用两级数据缓冲策略。第一级数据缓冲设计为硬件处理器现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)外

接双倍速率同步动态随机存储器(Double Data Rate Synchronous Dynamic Random Access Memory, DDR SDRAM)芯片,通过LVDS接口将采集的探测器机箱数据存放在DDR3 SDRAM芯片内^[4]。第二级数据缓冲设计为上位机程序,采用LabVIEW的列队操作函数实现数据的多线程处理。

在天文成像领域,单次曝光的图像光子数较少,通常无法得到观测区域的高质量图像,一般采用多帧图像叠合的方法提高图像质量^[5]。为了获取高质量多帧叠合图像,本文在多帧叠合成像的程序线程中设计了数据的提取、重构和阈值判读等模块,编写了LabVIEW彩虹调色板函数,并使用绘制平化像素图函数,实现了对多帧叠合颜色值元素数组的实时高质量成像,满足了FXT聚焦相机的实验需求。

2 系统硬件设计

FXT载荷分系统由聚焦相机、探测器机箱和电控箱等单机组成。其中,聚焦相机主要包括聚焦镜、准直器和探测器模块等,标定测试实验中聚焦镜安装在真空罐内,如图1所示。

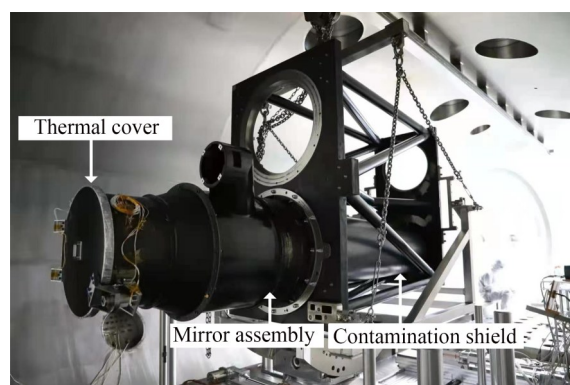


图1 Wolter-I聚焦镜

Fig. 1 Wolter-I Focusing mirror

数据采集系统的数传链路如图2所示。探测器模块采集X射线光子信号,串行输出电压信号送入到探测器机箱。探测器机箱的主要功能是给探测器模块供电,提供所需的驱动时序,将采集到的探测器模块的输出信号经过模数转换器(Analog-to-Digital Converter, ADC)转换为数字信号,形成事例数据。事例数据包含像素能量位

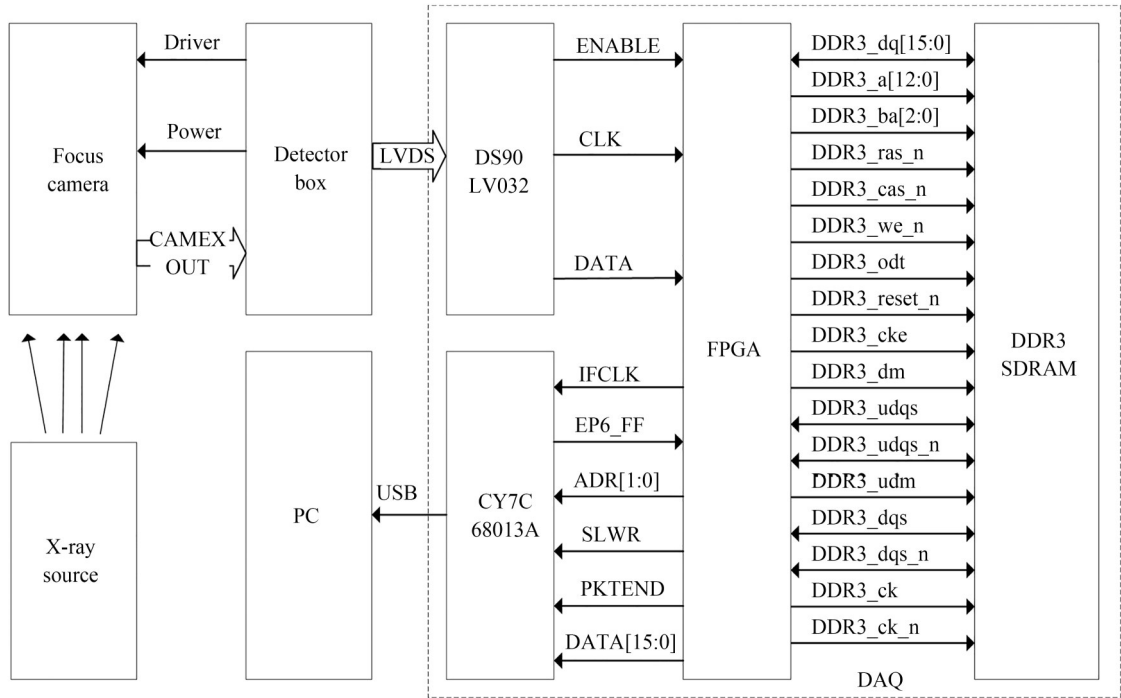


图2 数据采集系统的数传链路框图

Fig. 2 Data transmission link of DAQ systems

置信息,再将每帧所有事例数据打包成科学数据,通过LVDS接口发送给数据采集系统。不同工作模式下,LVDS发送的时钟频率不同,例如卫星系统约定LVDS发送时钟频率为25M。而地面测试的全图像读出模式发送速率约为71 Mb/s,即每秒 $384 \times 384 \times 12 \times 2 \times 20$ bit,其中 384×384 为像素个数,12为ADC位数,2为成像区和存储区,20为每秒帧数。因此,需要75M LVDS发送时钟频率,才能及时发送pnCCD每个点的像素信息。核心处理器FPGA通过LVDS接收器接收探测器机箱的科学数据,串并转换后写入数据缓存DDR3存储器中,再读出已存入DDR3存储器中的数据发送给USB(Universal Serial Bus)芯片上传到计算机。

3 系统软件设计

3.1 pnCCD简介

pnCCD是一款背照式全耗尽CCD,其耗尽层厚度为 $450 \mu\text{m}$,成像区和帧存储区像素都为 384×384 ,成像区像素尺寸为 $75 \mu\text{m} \times 75 \mu\text{m}$ ^[6-7]。pnCCD除了具有抗辐射、高帧频性能外,还具有X射线波段的高量子效率和能量分辨率^[8],在

0.3~10 keV能区的探测效率较高,非常适合较宽能段和高灵敏度的X射线天文探测。图3为探测器模块的结构示意图。FXT的探测器模块包括探测器pnCCD和多通路模拟信号处理芯片CAMEX(CMOS Amplifier and Multiplexer)ASIC两部分。CAMEX ASIC用于pnCCD信号的读出,探测器模块共集成了3片CAMEX ASIC,用于完成384路模拟信号的相关双采样,提供串行输出电压信号。探测器模块通过挠性

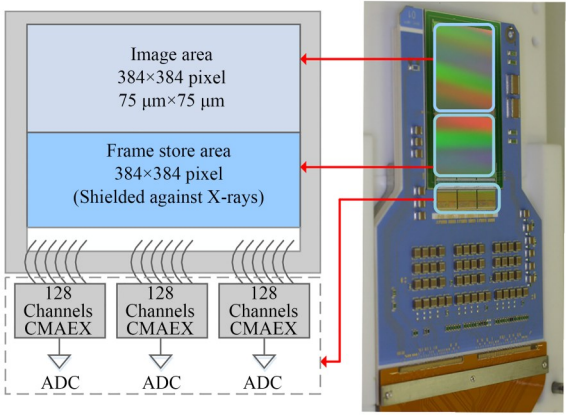


图3 pnCCD探测器模块示意图

Fig. 3 Schematic diagram of pnCCD module

电路板和探测器机箱的前端模块相连接。

探测器机箱发送给探测器模块各种驱动控制时序,使探测器工作在全帧、开窗和时变等模式。目前,FXT的pnCCD用于在轨科学观测时有全帧、开窗和时变等模式,此外,在地面测试时,还有全图像读出模式。本文选取pnCCD全图像读出模式和全帧模式介绍实时X射线成像的实现方法。全图像读出模式为探测器机箱对pnCCD阵面上的光子分别进行曝光、帧转移到存储区,再对 384×384 像素区域进行读出。此模式定义每帧数据内容包括帧头、帧序号、存储区和曝光区有效数据等信息。全帧模式每帧数据内容为多种事例的集合体。在全帧模式中产生的1帧事例包括帧头事例、帧尾事例、物理事例和背景强制触发事例等,每帧事例数不固定,帧头到帧尾的所有事例包含pnCCD产生的1帧图像信息,其中的每个物理事例包含像素的位置和能量信息。探测器机箱将采集到的探测器模块数据,按照规定模式的帧格式定义组帧打包,并通过LVDS接口发送给数据采集系统。

3.2 DDR3芯片功能模块

Xilinx FPGA 提供 MIG (Memory Interface Generator) IP 核生成 DDR3 控制器设计模块,模块包含可修改的硬件描述语言源代码^[9]。本文设置 DDR3 的时钟频率为 312.5 MHz,用户端接口方式为 2 个端口,每个端口为 64 位双向类型。用户端口有 3 个可交互的 FIFO (First In First Out) 存储器,一个为命令 FIFO,其中 cmd_addr 是当前数据处理字节的起始地址。cmd_bl 是当前数据处理的字个数,比如设置 6'b000011 为 1 次突发数据处理 4 个字的长度,每个字是用户使用端口位数,64 位端口 1 次突发的长度 4 个字就是 256 bit^[10]。cmd_instr 是当前指令的命令代码,3'b000 代表写操作,3'b001 代表读操作,另外两个为读数据 FIFO 和写数据 FIFO。因此,只要完成指令 FIFO 和数据 FIFO 的读写操作,就能实现对 DDR3 SDRAM 芯片的控制。

3.3 数据采集功能模块

图 4 为 FPGA 内部数据采集功能模块主要状态机流程,包括 FPGA 接收探测器机箱 LVDS 接口的科学数据,控制 DDR3 存储器和 USB 芯片

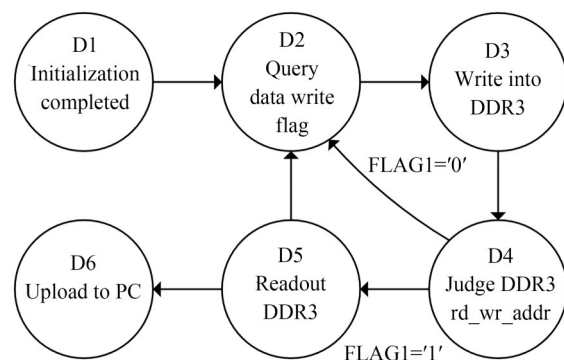


图 4 数据采集状态机流程

Fig. 4 Finite state machines of data acquisition

实现高速数据采集的方法。

状态 D1: 信号 calib_done 为 1 时,表明 DDR3 存储器初始化已经完成,可以对 DDR3 芯片进行读写操作,跳转到状态 D2。

状态 D2: 数据采集系统通过 LVDS 接口接收探测器机箱的科学数据,LVDS 使能信号在低电平有效的条件下,探测器机箱在 LVDS 时钟上升沿发送数据,数据采集系统在 LVDS 时钟的下降沿采集数据,将每 64 个 LVDS 时钟下降沿时刻采集到的单 bit 数据串并转换成位宽 64 bit 的数据后,发送 DDR3 写入标志信号,跳转到状态 D3。其中,接收来自探测器机箱 LVDS 接口的使能、数据和时钟信号都做亚稳态处理,确保数据采集满足触发器的建立和保持时间。由于 pnCCD 不同工作模式下探测器机箱 LVDS 发送的时钟频率不同,其中全图像模式 75M LVDS 发送的时钟频率为所有模式中最高发送频率,因此,只要满足全图像模式下的数据采集便可兼容其他模式。设计中选用 DDR3 模块锁相环 (Phase Locked Loop, PLL) 时钟输出的 312.5MHz 时钟作为采样时钟,采集探测器机箱 LVDS 发送时钟下降沿时刻的数据,因此满足各工作模式下的数据采集。

状态 D3: 判断命令 FIFO 满标志信号 cmd_full 为 0,表明命令 FIFO 可以写入指令,设计 1 次写入 64 bit 数据到 DDR3 存储器内,设置 cmd_instr 为写操作,设置 cmd_bl 为 6'b000000,在 DDR3 写地址后增添 3'b000 再赋值给 cmd_addr。写操作完成后 DDR3 写地址加 1,跳转到状态 D4。

状态 D4:判断 DDR3 存储器读写地址,读写地址差值大于设置值时跳转到状态 D5,否则回到状态 D2。

状态 D5:将当前读地址与当前写地址之间 DDR3 存储器中已存入的数据读出,设置 cmd_instr 为读操作,读操作完成后发送写入 USB 端点标志信号到状态 D6,赋值读地址与写地址一致,跳转回到 D2 状态等待下一次 DDR3 写入标志信号。

状态 D6:USB 功能模块用于完成 USB 芯片与计算机的数据传输。设置 CY7C68013A 配置寄存器 IFCONFIG 为使用外部时钟源,同步

Slave FIFO 模式,设置 FLAGB 为端点 6 FIFO 满标志。控制 FIFOADDR0 和 FIFOADDR1 地址线的电平选择端口,端点 6 为批量输入端点(FIFO 地址为 10),将读出 DDR3 存储器中的数据上传至计算机。

3.4 上位机用户界面

为了在采集数据的同时,对数据进行保存、解析和多帧叠合成像,FXT 系统用户界面 LabVIEW 编程采用队列函数,即生产者消费者的程序框架结构,以实现多线程处理^[11]。图 5 为全图像模式下多线程处理流程。

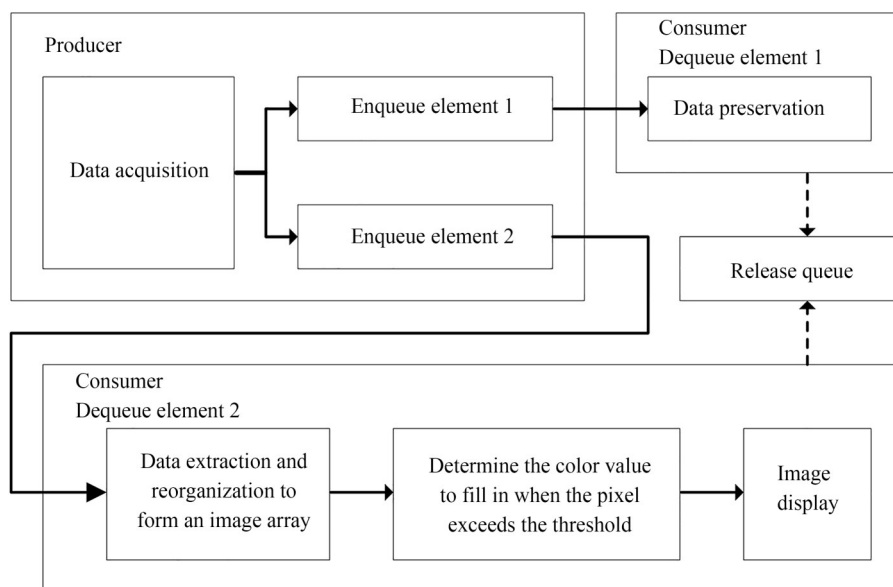


图 5 多线程处理框图

Fig. 5 Block diagram of multi-thread processing

生产者模块中的数据采集通过 VISA (Virtual Instrument Software Architecture) 写入函数接收 USB 接口的数据来实现。将接收采集到的数据作为入列函数的数据源,开辟两个队列,一个用于数据的保存,一个用于多帧叠合成像。在多帧叠合成像的线程中,全图像模式的数据处理方式首先是曝光成像区有效数据的提取,找到帧头和曝光区标识后提取 221 184 个字节,对应 384×384 像素能量信息,其中每个像素 ADC 的位数为 12 bit。由于采集的数据每 36 bit 依次对应 3 个 CAMEX 同一坐标位置的 3 个像素信息和,因此,需要对采集数据重构才能显示正确的图像。重构后的数据块每个像素的数值都要判断是否大

于阈值,大于阈值才能将颜色的步长值累加到此像素点的数值寄存器中。由此得到 1 帧元素为颜色值的 384×384 分辨率的图像数组。全帧模式的数据处理方式首先找到帧头事例和帧尾事例的标识符号,提取 1 帧的所有事例,找出所有的事例数据,提取每个事例数据的像素位置信息,将此像素点填充颜色的步长值,由此得到 1 帧元素为颜色值的图像数组。再将每帧图像数组存入移位寄存器中,用于累加到下帧的图像数组。对多帧叠合后的图像数组进行成像处理,便可分析聚焦相机对 X 射线的成像效果。用 8 位数据去索引一系列 RGB 颜色值组成的数据表,就可以用 8 位数据来表示彩色图像^[12]。这种情况下,RGB 颜

色组成的数据表称为调色板。因此,编写 LabVIEW 的彩虹调色板函数对数组数据进行颜色数值的转换,再使用平化像素图函数和绘制平化像素图函数,对数组数据进行成像处理,获得多帧叠合成像效果图。

4 实验调试与结果

在探测器机箱研制过程中,需要完成热真空、EMC 和力学等实验。这些实验需要分析数据采集系统采集的数据,以评估探测器机箱 LVDS 接口的数据传输功能。以热真空实验为例,探测器机箱放置于真空罐内,图 6 为数据采集系统与探测器机箱的实验现场。使用数据处理软件对约 70 个小时的数据进行分析,未发现丢失或错误,从而验证了在热真空条件下探测器机箱和数据采集系统 LVDS 接口数据传输的可靠性和稳定性。

FXT 聚焦相机标定实验在中国科学院高能物理研究所百米真空 X 射线标定装置中完成,该标定装置具有高精度电控转台系统,平移重复定位精度优于 $\pm 5 \mu\text{m}$,旋转重复定位精度优于 $\pm 5''$,可以提供聚焦相机精确的位置调节^[13-14]。并且配置了能量为 0.3~20 keV 自主设计的多靶 X 射线光源。实验中,聚焦镜的光轴对准过程是将聚焦镜从离轴(俯仰、旋转、摇摆)、离焦(焦前、焦后)状态移动到聚焦镜在轴、焦点位置状态^[15]。对轴过程是在 X 射线下,调节 FXT 聚焦相机的

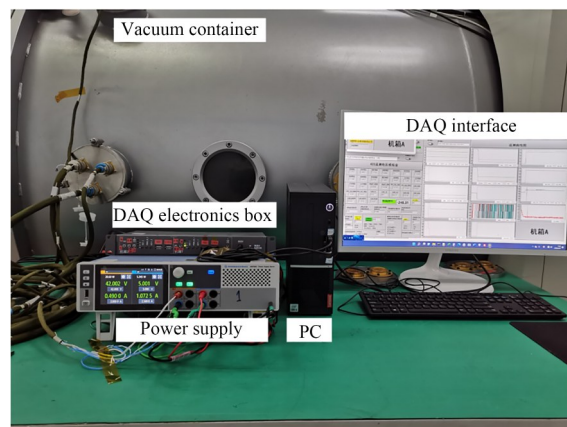


图 6 探测器机箱的热真空实验

Fig. 6 Thermal vacuum test of the detector electronics box

位置,通过二维方向扫描不同的角度,产生 pnCCD 成像图,计算出有效面积最大,此时对应的就是正轴方向。完成对轴后,此时的探测器不一定在焦平面处,此时需要前后移动聚焦镜,得到不同位置处的 PSF 与水平移动之间的关系,最小的 PSF 处即为焦点位置,由此完成聚焦镜的对焦。

图 7 显示了聚焦相机正轴离焦 65 mm,在全图像模式下 pnCCD 曝光区多帧图像叠合的过程。随着叠合帧数的增加,聚焦相机在 Al 靶下成像结果逐渐显现。408 帧、823 帧和 1 472 帧叠合图像分别如图 7(a)~7(c)所示。实验使用 30 μA 管电压 6 kV 的 Al 靶源,成像图为 384×384 像素图,颜色值步长设置为 64。

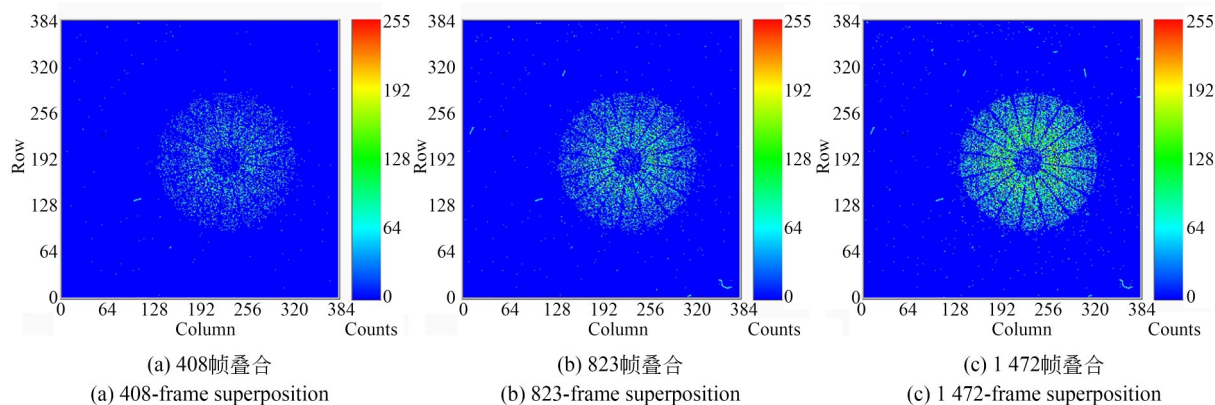


图 7 pnCCD 对聚焦镜的 Al 靶成像结果

Fig. 7 Al target image of focusing mirror captured by pnCCD

图 8 为 pnCCD 在全帧全透射(无遮光膜)工作模式下,使用 30 μA 管电压 6 kV 的 Ag 靶源,聚焦相机在焦 PSF 测试曝光区的成像结果。将成像区域划分成 8×8 个区域,每个区域选择一个入射角度,调试聚焦相机位置完成对 64 个区域和中心点处的数据采集,将所有区域的图像数据叠合得到整个成像区的 PSF 图像。可以看出,随着聚焦相机的对准位置离开中心点,离轴的角度越大,PSF 成像效果越倾向于蝴蝶形状。

5 结 论

本文研制了一种基于 pnCCD 的实时 X 射线成像数据采集系统,采用 LabVIEW 多线程数据处理和多帧图像叠合技术,设计多模式下的图像处理模块,编写彩虹调色板函数并使用平化像素图函数对图像数组进行成像,得到了 X 射线下 pnCCD 实时多帧叠合成像图,在两种工作模式下实现了 pnCCD 的实时成像。实验结果表明:此数据采集系统满足探测器模块 pnCCD 各

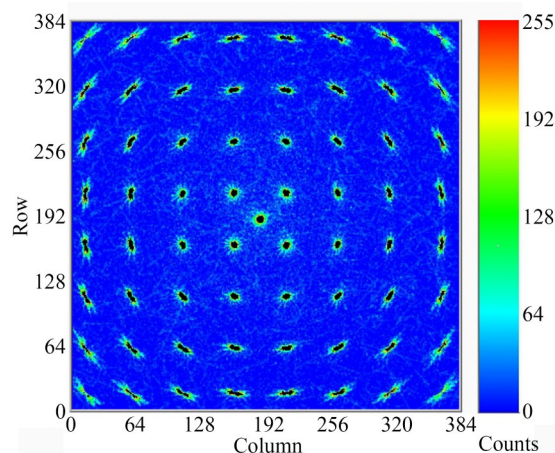


图 8 pnCCD 对聚焦镜的 Ag 靶 PSF 图像

Fig. 8 Ag target PSF image of focusing mirror captured by pnCCD

工作模式下的测试和实验要求,系统稳定可靠,实时的 X 射线成像能够快速呈现聚焦相机成像的位置信息,加快了聚焦相机 PSF 测试、对轴对焦等标定实验过程。该系统还可以扩展应用到其他 CCD 类探测器的 X 射线成像数据采集系统中。

参考文献:

- [1] 袁为民,张臣,陈勇,等. 爱因斯坦探针:探索变幻多姿的 X 射线宇宙[J]. 中国科学:物理学 力学 天文学, 2018, 48(3): 6-25.
YUAN W M, ZHANG CH, CHEN Y, *et al.* Einstein probe: exploring the ever-changing X-ray universe[J]. *Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica)*, 2018, 48(3): 6-25. (in Chinese)
- [2] CHEN Y, CUI W, HAN D W, *et al.* Status of the follow-up X-ray telescope onboard the Einstein Probe satellite[J]. *Proceedings of the SPIE*, 2020, 11444: 114445B.
- [3] 罗程远. 基于 Betatron 的数字化 X 射线成像系统的设计与实现[D]. 抚州: 东华理工大学, 2022.
LUO C Y. *Design and Implementation of Digital X-ray Imaging System Based on Betatron* [D]. Fuzhou: East China Institute of Technology, 2022. (in Chinese)
- [4] 郑志旺. 基于国产 FPGA 的数据采集存储系统的研究与设计[D]. 太原: 中北大学, 2021.
ZHENG ZH W. *Research and Design of Data Acquisition and Storage System Based on Domestic FP-*
- GA[D]. Taiyuan: North University of China, 2021. (in Chinese)
- [5] 陆波, 王子仁, 杨彦佳, 等. 基于 CCD 和 CsI 闪烁体的硬 X 射线成像[J]. 光学精密工程, 2017, 25(11): 2865-2871.
LU B, WANG Y S, YANG Y J, *et al.* Hard X-ray imaging based on CCD and CsI scintillator[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(11): 2865-2871. (in Chinese)
- [6] HERRMANN S, BUTTLER W, HARTMANN R, *et al.* Mixed signal pnCCD readout ASIC for the future X-Ray astronomy mission eROSITA [C]. *2007 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record. October 26-November 3, 2007. Honolulu, HI, USA. IEEE*, 2007, 3: 2398-2403.
- [7] MEIDINGER N, ANDRITSCHKE R, EBERMAYER S, *et al.* Development of the focal plane PNCCD camera system for the X-ray space telescope eROSITA [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2010, 624(2): 321-329.

- [8] ORDAVO I, IHLE S, ARKADIEV V, *et al.* A new pnCCD-based color X-ray camera for fast spatial and energy-resolved measurements[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2011, 654(1): 250-257.
- [9] 隋旭阳, 赖文娟, 李健. 基于FPGA的DDR3 SDRAM高速图像数据采集方法[J]. *兵器装备工程学报*, 2018, 39(5): 108-111.
SUI X Y, LAI W J, LI J. High-speed image data acquisition method of DDR3 SDRAM based on FPGA[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2018, 39(5): 108-111. (in Chinese)
- [10] 曹宗凯, 桑红石. 基于FPGA的DDR3高速图像缓存策略[J]. *信息通信*, 2020(8): 23-26.
CAO Z K, SANG H SH. DDR3 high-speed image cache strategy based on FPGA[J]. *Changjiang Information & Communications*, 2020(8): 23-26. (in Chinese)
- [11] 张亮, 安娜, 毛剑琳. 一种基于生产者-消费者设计模式的综合测试系统[J]. *自动化与仪器仪表*, 2021(4): 71-73, 81.
ZHANG L, AN N, MAO J L. A comprehensive test system based on producer consumer design pattern[J]. *Automation & Instrumentation*, 2021(4): 71-73, 81. (in Chinese)
- [12] 杨高科. 图像处理、分析与机器视觉: 基于LabVIEW[M]. 北京: 清华大学出版社, 2018.
YANG G K. *Image Processing, Analysis and Machine Vision: Based on LabVIEW* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2018. (in Chinese)
- [13] WANG Y S, ZHAO Z J, HOU D J, *et al.* The 100-m X-ray test facility at IHEP[J]. *Experimental Astronomy*, 2023, 55(2): 427-445.
- [14] 赵子健, 王子仁, 张留洋, 等. Wolter-I型聚焦镜X射线光学实验与仿真[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(11): 2330-2336.
ZHAO Z J, WANG Y S, ZHANG L Y, *et al.* Experiments and simulation of X-ray optical Wolter-I focusing mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(11): 2330-2336. (in Chinese)
- [15] 陈灿. eXTP-SFA地面标定装置设计及标定方法研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2022.
CHEN C. *Study on the Design of Calibration Device and Calibration Method for eXTP-SFA* [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2022. (in Chinese)

作者简介:



霍 嘉(1983—),男,吉林公主岭人,工程师,2010年于西安科技大学获得硕士学位,主要从事探测器读出系统和测试系统的设计。E-mail: huoj@ihep.ac.cn

通讯作者:



陈 勇(1970—),男,江苏海门人,研究员,1992年于复旦大学获得学士学位,1998年于中国科学院高能物理研究所获得博士学位,主要从事高能天文实验与数据分析。E-mail: ychen@ihep.ac.cn