

doi: 10.3788/gzxb20164511.1112003

模块化天文 CCD 通用控制器

张玉衡^{1,3,5}, 魏名智^{1,2,4}, 宋谦^{1,2}, 颜毅华^{1,3}

(1 中国科学院国家天文台, 北京 100012)

(2 中国科学院光学天文重点实验室, 北京 100012)

(3 中国科学院太阳活动重点实验室, 北京 100012)

(4 美国加利福尼亚大学 UCO / Lick 天文台 CCD 实验室, 美国 圣克鲁斯 加州 95064)

(5 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要:为满足大规模拼接 CCD 天文观测应用系统对控制器的特殊要求, 开展可扩展的模块化天文 CCD 通用控制器技术研究, 并成功研制了样机系统. 该系统采用相关双采样技术及控制技术等手段获得极低的读出噪声, 采用全数字化的结构实现系统的通用性以及实现远程观测、远程监控的功能. 测试结果表明, 该系统的系统噪声小于 $3e^-$, 动态范围为 16 bit, 非线性优于 1%, 满足现阶段大部分天文观测的需要. 作为应用实例, 利用本系统制作的真空紫外 CCD 相机, 成功获得了 He 和氘 121.5 nm、164、193、205、218.6、273.3 和 294.5 nm 谱线的光谱图像, 完成了对空间天文观测的 102 nm~320 nm 光谱仪的检测工作.

关键词:科学 CCD; 多 CCD 拼接; CCD 控制器; 低噪声; 模块化; 紫外成像

中图分类号: TP386.5

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)11-1112003-7

Development of an Astronomical Modularized CCD Universal Controller

ZHANG Yu-heng^{1,3,5}, WEI Ming-zhi^{1,2,4}, SONG Qian^{1,2}, YAN Yi-hua^{1,3}

(1 National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China)

(2 Key Laboratory of Optical Astronomy, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China)

(3 Key Laboratory of Solar Activity, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China)

(4 CCD Lab, UCO/Lick Observatory, University of California, Santa Cruz, California 95064, USA)

(5 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To meet the increasing demands of large mosaic CCD cameras from astronomical observation, an modularized CCD universal controller was developed. The modularization design is based on the principle that the system can be extended easily to drive multiple CCDs. Great efforts are exerted to reduce the system noise of the controller. A fully digital structure is chosen therefore the clocking and biasing can be tuned to control different kinds of CCDs and all the controlling data can be monitored remotely. With efforts, the system's readout noise reaches $2.61e^-$, dynamic range 16 bit, nonlinearity less than 1%, and these parameters meet the criteria required for most of the astronomical observations for the time-being. With this controller, a CCD camera is constructed to test a spectrograph which is designed to work from 102 nm to 320 nm for space astronomical observation and the spectrums of helium and deuterium lines of the 121.5, 164, 193, 205, 218.6, 273.3 and 294.5 nm are acquired.

Key words: Scientific CCD; Multi-CCD mosaic; CCD controller; Low noise; Modularization; Ultraviolet imaging

OCIS Codes: 120.0120; 040.0040; 040.1490; 040.1520; 110.0110; 300.0300

基金项目: 国家自然科学基金(No. 11473042)和国家高技术研究发展计划(No. 2008AA12A208)资助

第一作者: 张玉衡(1986-), 女, 博士研究生, 主要研究方向为天文 CCD 控制器及射电天文仪器. Email: yhzhang@bao.ac.cn

导师: 魏名智(1945-), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为天文 CCD 及 CCD 控制器. Email: Lick_wmz@ucolick.org

收稿日期: 2016-04-20; 录用日期: 2015-07-07

0 引言

天文学是研究宇宙中各种不同尺度天体的运行、结构、组成、起源及其演化的学科。由于宇宙尺度巨大、天体之间距离遥远,天文观测总是希望获得更微弱的天体信号,这就需要天文观测设备具备越来越高的灵敏度。对于观测设备前端的 CCD 探测器而言,具有极低的系统噪声成为使用的基本要求。随着技术的进步,以空间 2.4 m 哈勃望远镜和一批地基 8~10 m 望远镜为主导,配合中小望远镜及大规模 CCD 阵列构成的探测终端的应用使光学天文逐渐进入广域巡天和局域精细观测时代,大视场、大口径望远镜及与之配套的大规模 CCD 阵列图像接收器成为现代光学天文设备发展的方向^[1-3]。

工艺的限制使得目前单片 CCD 可容纳的像元数量最大是 10 K×10 K,因此天文观测所需要的大阵列图像接收器需要多片 CCD 拼接实现。目前拼接规模最大的是正在研制中的 189 片 4 K×4 K CCD 拼接的 30 亿像元的大型综合巡天望远镜(Large Synoptic Survey Telescope),此外,还有 12 亿像元的 Pan-STARRS 相机、9.35 亿像元的 Gaia 相机、6.4 亿像元的 Euclid 相机等。我国即将开始研制的空间站多色成像与无缝光谱巡天相机也是此类大规模拼接系统,其像元数目达到 27 亿,由上百片的 CCD 拼接完成。此外,我国参与的三十米望远镜(Thirty Meter Telescope)项目中的 WFOS(Wide-Field Optical Spectrograph)探测器系统也需要多 CCD 拼接。

在此背景下,以天文观测拼接 CCD 阵列探测器为应用目标,并为 CCD 控制器电路专用集成电路(Application-Specific Integrated Circuit, AISC)研制做前期技术准备,本文开展模块化 CCD 控制器的技术研究,并研制了一套模块化天文 CCD 通用控制器系统。该系统指标达到天文观测要求,模块化的设计使得系统具备可扩展性,可支持大型拼接 CCD 系统。

该控制器采用可扩展的模块化结构,由主控模块和读出模块组成,模块的类型选择和数目由 CCD 的数目和型号决定。此外,全数字化结构的运用实现了系统通用性、远程观测、远程监控等功能。本文详细介绍了模块化天文 CCD 通用控制器的系统设计思想和主控模块、读出模块的设计原理,展示了样机测试的结果以及紫外光谱仪检测试验的应用结果。其中,读出模块的核心电路以及主控模块的工作时序已应用于本课题组研制的诸多天文相机系统中。例如,我国目前最大的光学望远镜 LAMOST 的 32 台光谱 CCD 探测器和 4 台导星 CCD 探测器、台湾中央大学鹿林天文台四色系统的红端高阻 CCD 相机、上海天文台 1.5 m 望远镜 CCD 以及云南天文台四色 CCD 系统等。此外,利用读出模

块和主控模块研制的 CCD 控制器应用于真空紫外波段,利用这套相机系统,完成了 863 课题“空间紫外天文台有效载荷关键技术”真空紫外光谱仪的检测试验^[7-8]。

1 控制器总体设计

模块化天文 CCD 通用控制器既可供单独 CCD 使用,也可支持多 CCD 的拼接,其基本结构由主控模块和读出模块两部分组成。每个读出模块最多可支持四个 CCD 输出通道,根据需求支持 CCD 的读出通道数量选择读出模块的数量。多个读出模块共用一个主控模块。主控模块提供电源、驱动时序信号控制参量以及图像数据接口。

对于单 CCD 系统,通常使用一个主控模块和一个 CCD 读出模块即可满足工作要求。对于多 CCD 拼接系统,则需要多个 CCD 读出模块,其结构如图 1。

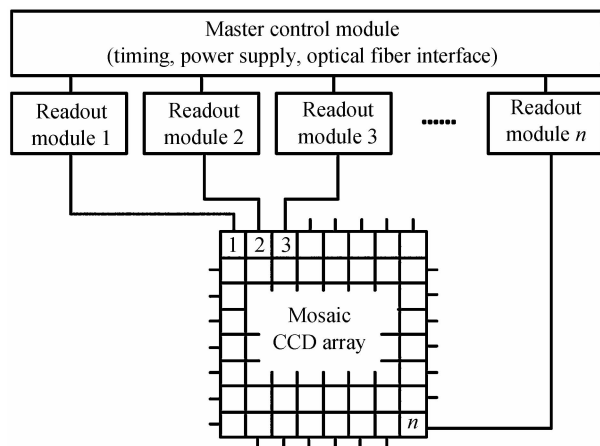


图 1 多 CCD 拼接系统结构示意图

Fig. 1 Framework of multi-CCD mosaic system

主控模块和 CCD 读出模块是模块化 CCD 控制器的研究重点。主控模块由可支持多个读出模块的公共时序电路、光纤接口电路和电平转换电路组成。读出模块由四通道信号处理电路、模拟数字转换器(AnalogtoDigital Converter, ADC)及图像数据处理接口、CCD 驱动电路和温控及监视电路组成。其结构如图 2。

主控模块提供整个系统的电源供给,输出控制 CCD 工作所需的各种波形信号和信号处理波形,并提供主控模块与读出模块的数据传输以及系统与外部计算机之间的传输数据接口,其主控时序电路基于现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)和微处理器实现。

读出模块中信号通道采用模拟的相关双采样技术,读出模块与主控模块之间采用远程连接技术,这样可以在保证 CCD 图像信号质量的同时最大限度地减小 CCD 前端的体积和重量,使控制器的其它部分可放

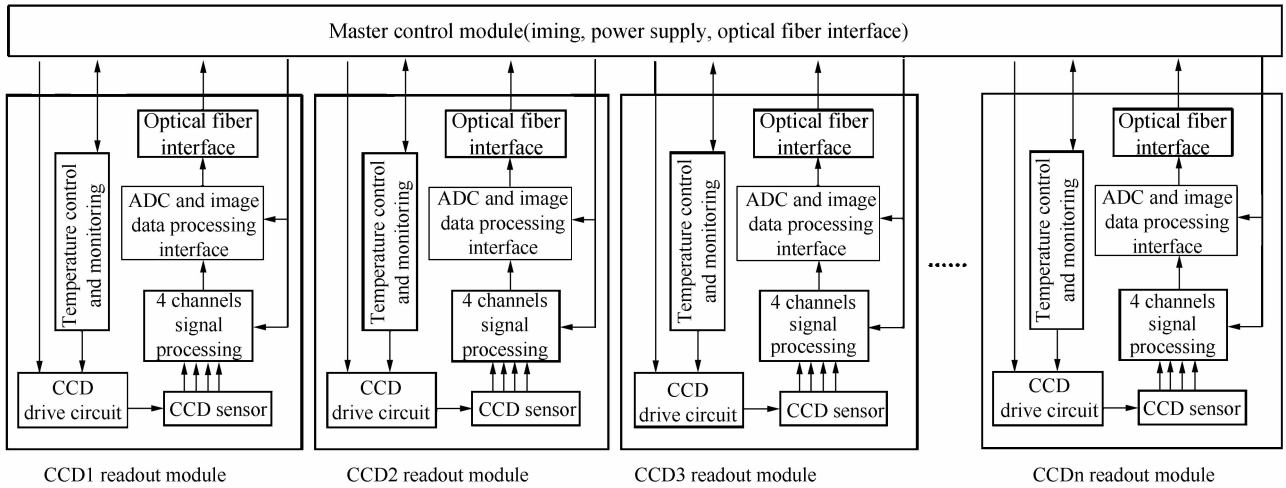


图 2 基本结构示意图

Fig.2 Framework of system

置到任何方便的位置,从而最大限度地降低探测器对成像位置处占用空间和重量承载的要求。

2 实现方法

2.1 主控模块

主控模块中的主控时序是模块化 CCD 控制器中最核心的部分,主要负责接收外部控制计算机的控制指令,为 CCD 读出模块提供 CCD 工作所需的波形信号和信号处理波形。主控时序由 FPGA、微处理器、数据存储器、数据总线接口、RS232 通信电路等部分构成。主控模块的主要电路结构框图如图 3。

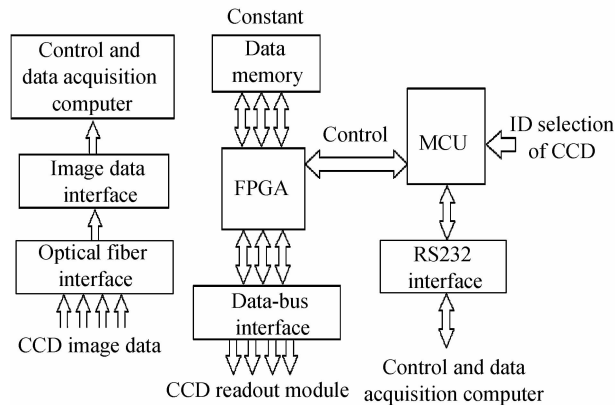


图 3 主控时序电路结构框图

Fig.3 Framework of master timing circuit

作为通用型控制器,系统可控制多种型号的 CCD。系统可存储多种型号 CCD 的控制波形和相关参量,微处理器通过读取所需控制的 CCD 型号 ID 号,自动从数据存储器中导入对应 CCD 相应波形及相关常量,根据微处理器的控制要求,发出相应的驱动波形。外部控制计算机与 FPGA 之间的中间响应单元为微处理

器。CCD 的基本操控指令参量由外部控制计算机发出,通过 RS232 接口传入微处理器。微处理器将指令按功能要求转化为 FPGA 的任务指令,存入 FPGA 内的操作时序寄存器。

CCD 整个工作过程包括 CCD 擦洗、曝光、垂直和水平转移预读、读出等,每个步骤都通过外部计算机发送指令,然后由 FPGA 的主控时序以及控制这些时序的一系列参量寄存器和计数器完成。参量寄存器由微处理器根据读出要求预先设置。一旦控制计算机发出曝光读出指令,CCD 进入读出阶段,系统则立刻脱离 CCD 与微处理器的关系,并置处理器进入休眠状态。这时,FPGA 脱离微处理器和外部计算机的控制,CCD 仅受 FPGA 控制,并按照参量寄存器的参量规定一步步进行下去。这些参量寄存器存储了 FPGA 每一步流程使用的波形、执行的时间和反复次数等。在读出过程中,各控制时序与 CCD 读出时序保持精密同步。

当 CCD 读出结束时,或外部发出强制中断读出请求信号时,微处理器会从休眠状态被唤醒,重新获得对系统的控制权以及对外部计算机的通信功能。经多个系统设计应用的验证,这种设计可有效消除非同步数字信号的干扰,并使控制器拥有极低的读出噪声。

CCD 读出的时序、波形以及电压设置等参量可以由主控模块任意指定,从而保证控制器适于各种 CCD (P 型、N 型、MPP 或非 MPP 等)、各种观测模式和读出模式(帧转移式、全帧读出式、漂移扫描式等^[4])以及单 CCD 或多 CCD 系统。

图 4 为全帧读出式 CCD 的典型时序图。每一个时序步骤都由若干参量寄存器控制。这些参量指定了读出步骤中涉及到的波形文件的起始地址、主钟频率以及重复次数等。

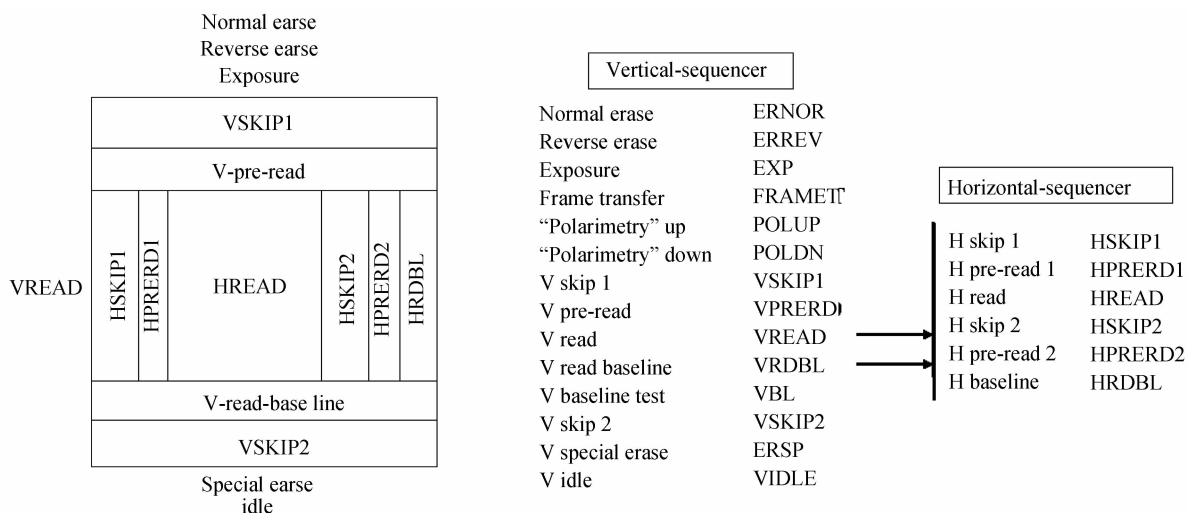


图 4 全帧读出式 CCD 典型时序图

Fig. 4 Typical sequence diagram of full frame CCD structure

2.2 读出模块

CCD 读出模块由 CCD 驱动电路、四通道信号处理、温度控制及监视、图像信号 16bit ADC 及图像数据接口等几个部分组成。CCD 驱动电路负责将主控模块中主控时序发出的波形信号进行电平转换，得到符合 CCD 工作需要的驱动时序。四通道信号处理电路负责对 CCD 输出的模拟信号进行相关双采样 (Correlated

Double Sample, CDS) 并为 CCD 片上的放大器及 CDS 电路提供偏置电压。相关双采样电路由分立元件构建。ADC 及图像数据接口负责将相关双采样后的数据进行模数转换，并传输至主控模块的光纤接口，并由主控模块输出至外部计算机进行保存和处理。

图 5 为单通道信号处理板的电路原理图。这是 CCD 输出信号首先经过的信号通路。

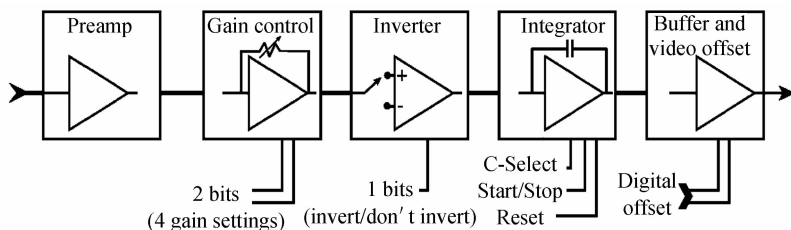


图 5 单通道信号处理板电路原理图

Fig. 5 Single channel signal processing board circuit schematic

CCD 输出的模拟信号依次通过前置放大器、增益可控的二级放大器、反相器、积分器、作为缓冲及补偿的跟随器后，完成相关双采样过程。相关双采样即在每个像素周期内对参考电平和信号电平各进行一次采样，然后将两次采样值相减，得到视频信号的真实成分。由于作减的两个信号为同一像素周期信号，相减可去除相关噪声，故此法较一般方法而言更能抑制噪声。在信号通路中，前置放大器为定值预放大器。第二级的放大器为增益可控的放大器，有四挡增益可选。反相器为可控式反相器，基准信号采样与图像信号采用有相反极性，这样可使相关噪声在积分器中相互抵消。积分器的积分时长由主控脉冲宽度控制，积分速率通过选择不同的电容值来改变。四通道信号处理板中有四路信号处理通路，即有四套单信号通路。单信号通路间彼此独立，经测试信号之间的串扰可以忽略。

字模拟转换器 (Digital to Analog Converter, DAC) 提供，也就是 CCD 的所有驱动脉冲和偏压都由主控模块提供的数字控制。这种完全数字化的电压配置为系统的远程控制、监视和调试创造了必要的硬件支持。也为系统的通用性创造了便利。此外，所有的电压还由主控模块内另外的多路 ADC 进行实时在线实测，以保证 CCD 的正常和安全工作。

信号处理的输出信号经 16bit ADC 进行模数转换，形成这一通道的图像数据。每个 CCD 的四路图像数据经由另一个 FPGA 进行数据重组，送至光纤接口，传入主控模块中后再由数据接口送至外部计算机。

CCD 读出模块中的温度控制及监视板可以测量两种温度，外部温度和内部温度。外部温度指控制器机箱内的环境温度。内部温度指 CCD 在冷却杜瓦内的工作温度。

读出模块内采用 VME (Versa Module Euro-card,

每个读出模块的 CCD 驱动钟和 CCD 偏压都由数

VME)总线结构,把母板与各功能板连接起来.母板上有一组八位跳线的选择器,用于主控模块识别该读出模块的 CCD 的 ID 号.选择器定义的八位 ID 数字与 CCD 型号一一对应,可以分辨 256 种不同 CCD.每个 ID 都定义了一组独特的波形、电压以及其他操作参量,存在主控模块主控时序中的不挥发存储器中.也就是说,通过改变 ID 跳线可方便地转换 CCD 型号,读出模式等,从而使本系统具有通用性,方便地根据需要切换不同的 CCD 驱动模式.

3 性能测试

利用 E2V 公司生产的科学级 CCD 芯片 CCD203-82^[6]对系统的各单元模块进行全面测试.在实验过程中,CCD203-82 处于 -100°C 环境.

3.1 测试增益动态范围、线性、读出噪声

CCD 增益动态范围、线性和读出噪声可以用光子转移曲线(Photon Transfer Curve, PTC)来测定.结果如图 6.在系统增益为 $0.987\text{e}^{-}/\text{DN}$ 的 16bit 动态范围内线性误差小于 1%,读出噪声在 $8\ \mu\text{s}$ 采样时间下为 2.61e^{-} ,读出噪声达到 E2V 公司出厂 CCD 时的极限指标^[6].

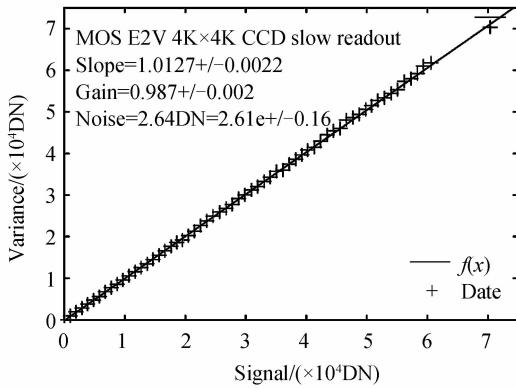


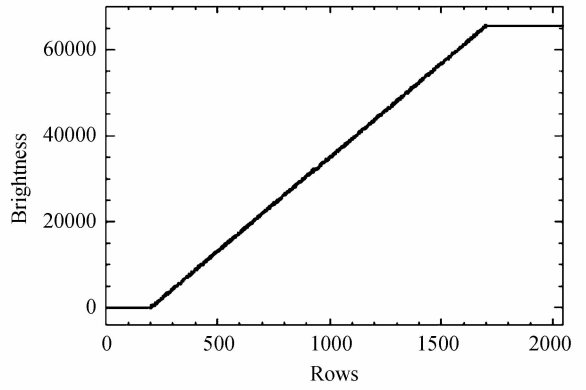
图 6 CCD203-82 在 -100°C 的光子转移曲线

Fig. 6 Photon transfer curve of CCD203-82 at -100°C

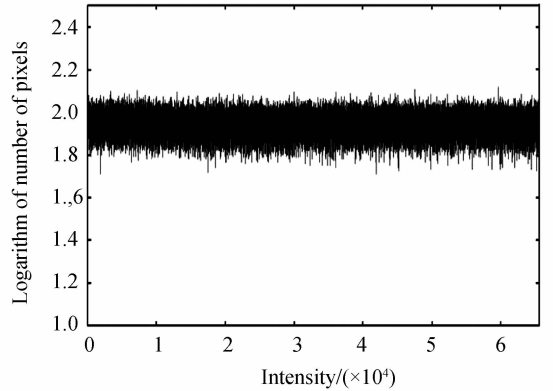
在图 7(a)所示的试验中,控制 CCD 曝光量,使亮度从 0(暗场)到最大亮度(65535DN)均匀变化.图 7



(a) CCD image in the experiment of exposure changes



(b) Corresponding brightness



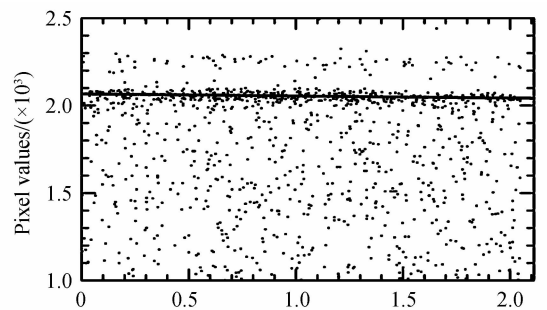
(c) ADC data distribution histogram

图 7 曝光读出实验结果

Fig. 7 Experimental results of exposure readout (b)表明系统在 $0\sim 65535\text{DN}$ 范围内的线性很好.图 7 (c)为数据分布直方图,可以看到在整个动态范围内($0\sim 65535\text{DN}$)ADC 数据分布均匀,没有出现转换缺陷和某一位的丢失.

3.2 系统的水平转移效率和垂直转移效率测试

Fe^{55} X 射线源成像是检验系统水平转移效率和垂直转移效率的最佳方法. Fe^{55} X 射线源具有稳定的能量,每个事件在 CCD 上激发 1 620 个电荷,用统计方法测量那些落到单一像素上的事件的实测电荷数,就可精确测量 CCD 系统的增益.测量水平方向接近读出口一侧和远离读出口一侧的电荷数的差别,可精确获得 CCD 在多次转移(如本例进行了 2 048 次转移)后因转移而损失的电荷数,从而计算 CCD 的转移效率.图 8



(a) Horizontal at -120°C

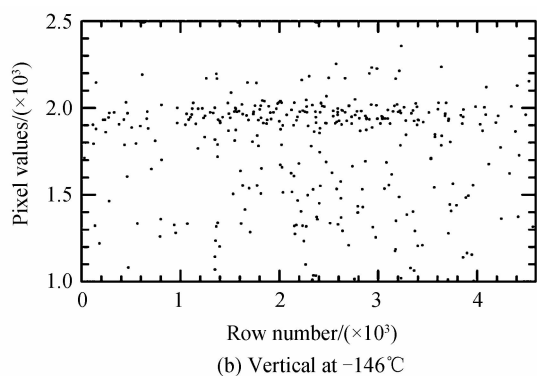


图 8 CCD 转移效率 X 射线测试结果

Fig. 8 X-ray test results of transfer efficiency for CCD

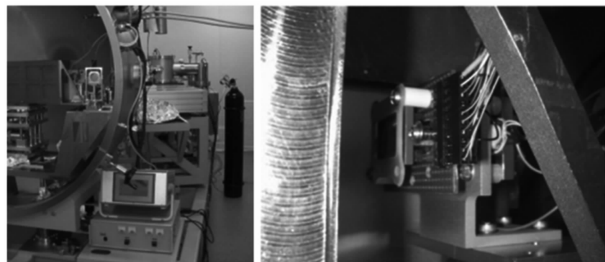
(a) 是 CCD 水平转移效率 X 射线测试图, 测定的水平转移效率为 0.999 995. 同样的方法可以测量垂直转移效率, 转移次数为 4 096. 从图 8(b) 可以测定 CCD 的垂直转移效率达 0.999 999.

4 应用

本文研制的读出模块的核心电路以及主控模块工作时序已应用于 LAMOST 的 32 台光谱 CCD 探测器和 4 台导星 CCD 探测器、鹿林天文台四色系统的红端高阻 CCD 相机、上海天文台 1.5 m 望远镜 CCD 以及云南天文台四色 CCD 系统等多台天文相机系统. 其中 LAMOST 自投入观测以来已取得大量光谱巡天资料, 观测了数千个天区, 对外发布了数百万余条光谱数据, 其中还包括数百万恒星光谱参量星表^[7-8]. 鹿林天文台四色系统的红端高阻 CCD 相机、上海天文台 1.5 m 望远镜 CCD 均已投入观测, 而云南天文台四色 CCD 系统也已交付用户.

利用本文研制的 CCD 控制器, 以及可工作于真空紫外波段的 E2V CCD 42-10^[9], 构建了一台相机, 完成

了 102~320 nm 波段紫外光谱仪的性能检测工作. 该光谱仪的主要工作波段在真空紫外波段, 因此检测装置的整个光路均安装于真空环境中. 图 9 为安装被测光谱仪及 CCD 探测器的真空舱, CCD 控制器安装于真空舱外壁上. CCD 采用制冷机制冷, 工作温度为 -100℃.

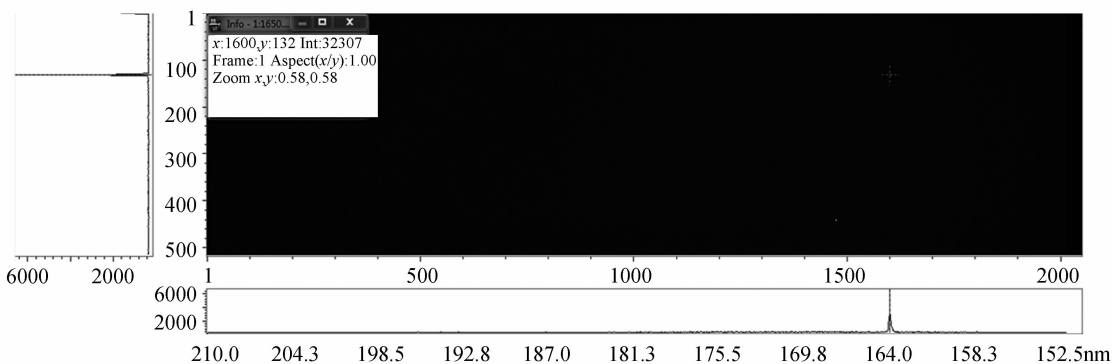


(a) Vacuum chamber for the UV spectrograph (102~320nm) (b) CCD detector in the chamber

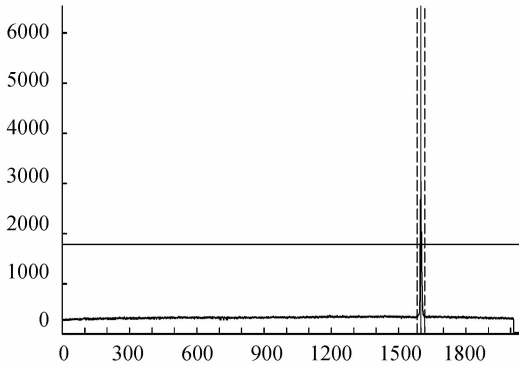
图 9 紫外光谱仪实验设备

Fig. 9 Ultraviolet spectrometer experimental equipment

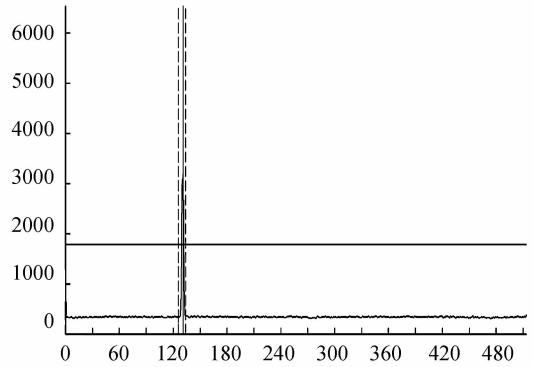
光谱仪技术指标要求在 104~320 nm 波段光谱分辨力达到 1 000~2 000, 空间分辨率为望远镜物方 1". 由工作于 104~170 nm 的远紫外光谱仪 (Far Ultraviolet, FUV) 和 160~320 nm 的近紫外光谱仪 (Near Ultraviolet, NUV) 组成. 检测实验利用氙灯和 He 等离子光源通过单色仪衍射分别得到 121.5 nm、164 nm、193 nm、205 nm、218.6 nm、273.3 nm 和 294.5 nm 的单色光, 通过 10 μm 直径针孔对光谱仪进行测试. CCD 相机成功获取了谱线的光谱图像. 图 10 为 NUV 光谱仪在 164 nm 波长的检测结果. 从 CCD 图像中测量得到, 光斑像在色散方向点扩散函数 (Point Spread Function, PSF) 为 0.076 mm, 对应波长宽度为 0.162 nm, 满足光谱分辨力 ≥ 1 000 的要求; 成像方向 PSF 为 0.030 mm, 对应于物方张角 1.02".



(a) The dispersion image taken by the CCD camera



(b) The intensity of the pinhole image along the direction of dispersion(The FWHM of the image is 5.63 pixels or 0.076mm)



(c) The intensity of the pinhole image along the direction normal to the dispersion(The FWHM of the image is 2.20 pixel or 0.030mm)

图 10 用 CCD42-10 拍摄的 164 nm 谱线照片和其测量结果

Fig. 10 164 nm spectral line photo taken with CCD42-10 and its measurement results

5 结论

针对天文 CCD 对控制器的技术要求,完成了模块化天文 CCD 控制器的设计、样机研制以及性能测试。测试结果表明其系统噪声小于 3ϵ (包含被测系统中 CCD 器件的噪声),动态范围 16 bit,非线性优于 1%,达到了目前大部分天文观测要求的指标水平。该控制器的研制成功,为下一步研制 ASIC 化的 CCD 控制器,满足超大规模 CCD 拼接控制器的需求提供了必要的技术准备。

致谢 紫外 CCD 相机成像试验使用国家天文台空间天文技术实验室真空紫外光谱仪检测装置完成,并得到王森研究员、郭永卫高工的指导和帮助。

参考文献

- [1] ANING Z, BLALOCK B J, ERICSON M N, *et al.* A high voltage CCD sensor control chip for the large synoptic survey telescope (LSST) [C]. IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record, 2008; 2074-2078.
- [2] DOHERTY P E, ANTILOGUS P, GILMORE D K, *et al.* Electro-optical testing of fully depleted CCD image sensors for the Large Synoptic Survey Telescope camera[C]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering,

2014, **9154**(2):38-39.

- [3] XUE Yan-jie, XUE Sui-jian, ZHU Ming, *et al.* Overview of current status and development strategies in china's astronomical facilities and related technologies[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2014(3):368-375.
薛艳杰, 薛随建, 朱明, 等. 天文望远镜技术发展现状及对我国未来发展的思考[J]. 中国科学院院刊, 2014(3):368-375.
- [4] ZHANG Yu-heng, YAN Yi-hua. Design of frame transfer area CCD imaging system for dark objects[J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2015(3): 295-304
张玉衡, 颜毅华. 针对暗目标的帧转移面阵 CCD 成像系统设计 [J]. 天文学报, 2015(3):295-304.
- [5] WEI Ming-zhi, STOVER R J. New design for the UCO/Lick observatory CCD guide camera[C]. SPIE, 1996, **2654**: 226-232.
- [6] E2V Corporation. CCD203-82 back illuminated scientific CCD sensor data sheet[R]. 2005: 1-2
- [7] CUI Xiang-qun, ZHAO Yong-heng, CHU Yao-quan, *et al.* The large sky area multi-object fiber spectroscopic telescope (LAMOST) [J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2012, **12**(9): 1197-1242.
- [8] ZHAO Gang, ZHAO Yong-heng, CHU Yao-quan, *et al.* LAMOST spectral survey-an overview [J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2012, **12**(7): 723-734.
- [9] E2V Corporation. CCD42-10 back illuminated high performance AIMO data sheet[R]. 2006: 1-2.