

文章编号 1004-924X(2010)06-1396-08

电子倍增 CCD 星相机的设计

何家维^{1,2}, 何 昕¹, 魏仲慧¹, 耿玉芝¹, 王一凡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 研究生院, 北京 100039)

摘要:针对导航领域对星相机的性能要求,通过在星相机中应用新型的电子倍增 CCD(EMCCD),设计一种探测能力强、数据更新快的成像系统。说明了 EMCCD 工作原理,分析了 EMCCD 信噪比,介绍了基于 TC285 电子倍增 CCD 的星相机的设计方案,给出了 CCD 驱动电路、视频信号处理电路以及时序控制器的设计。用模拟拍星实验和实际拍星实验验证了所设计的相机的性能,同时对相机的应用进行了初步分析。通过分析实验图像的信噪比说明了设计的星相机具备在积分时间 8 ms 以内探测 6 等星的能力,且其图像数据更新频率可达 10 frame/s,满足用短积分时间进行快速星光成像的要求。

关键词:电子倍增 CCD; CCD 星相机; 微光探测; TC285

中图分类号: TN386.5; V447.3 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20101806.1396

Design of EMCCD cameras for star detection

HE Jia-wei^{1,2}, HE Xin¹, WEI Zhong-hui¹, GENG Yu-zhi¹, WANG Yi-fan¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract: An imaging system in a star camera with higher detection ability and faster data update frequency was designed based on a Electron Multiplying CCD (EMCCD). To meet the performance requirements of the space navigation for star cameras, EMCCD technologies were discussed in theoretical and engineering aspects. Then, the working principle of EMCCD and its SNR were analyzed. Based on TC285 EM CCD, a design scheme for the star camera was described and the CCD driving circuit, TV signal processing circuit and a timing controller in the camera were given. Furthermore, the camera performance was verified by simulation and experimental methods and its applications were analyzed primarily. By analyzing the experimental images, it is concluded that the camera can detect the M_v6 stars in the integration time of 8 ms, and its image data update frequency can reach 10 frame/s. These results meet the rapid imaging requirements in short integration time.

Key words: Electron Multiplying CCD(EMCCD); CCD star camera; low-light-level detection; TC285

1 引言

星相机是主要用于拍摄星光图像的相机。这类相机多用于航天、导航、航空、天文等领域作为各类设备的成像系统,例如导航设备星敏感器就采用星相机作为探测前端,星相机性能是决定星敏感器性能的关键因素。随着科学技术的不断进步,要求星敏感器这类导航设备具有更高的数据更新速度和更小的体积,由此也要求星敏感器等设备中使用的星相机具有高的灵敏度,要能在很短的积分时间内探测到极微弱的星光信号,以便得到快速的数据更新频率,为数据处理和调整飞行器姿态赢得时间。另外,通过提高图像传感器的灵敏度,还可以减小光学系统的体积,从而减小整个导航设备的体积;同时,图像传感器的灵敏度越高,在一定视场内可探测到的恒星数量也就越多,从而可以为星识别等软件处理提供更多的信息^[1]。不难看出,提高星相机中使用的图像传感器的灵敏度是星相机设计的关键问题。

近年来,一些新型图像传感器逐步进入实用阶段,电子倍增电荷耦合器件(Electronic Multiplying CCD)就是其中之一。与其他几种高灵敏度 CCD(如 ICCD、EBCCD、TDICCD)相比,EMCCD 具有体积小、寿命长、无需延长光积分时间等优点。通过在传统 CCD 结构基础上增加固态电子倍增结构,其灵敏度一般可达到传统 CCD 的几百倍,一些 EMCCD 甚至具有单光子探测能力^[2]。

分析 EMCCD 的结构和工作特点可以发现,它的高灵敏度特性使其具备在短积分时间内进行高信噪比的星光探测能力,这种特点决定了它比较适合在导航设备的星相机上使用。本文从 EMCCD 的原理和工程应用两个方面对 EMCCD 星相机的设计进行了研究,同时使用所设计的相机进行了模拟和实际拍星等相关实验,并对实验结果进行了分析。

2 EMCCD 原理与 TC285 的特点

2.1 EMCCD 的结构与原理

EMCCD 技术始于“全固态电子倍增技术”^[3]。其与传统 CCD 的不同在于串行读出寄存器后增加了固态电子倍增结构(CCM),信号电荷在进入读出放大器前先进行电荷倍增放大,因此 EMCCD 不受读出噪声的限制,极大地提高了传感器灵敏度。图 1 是 EMCCD 的结构示意图。

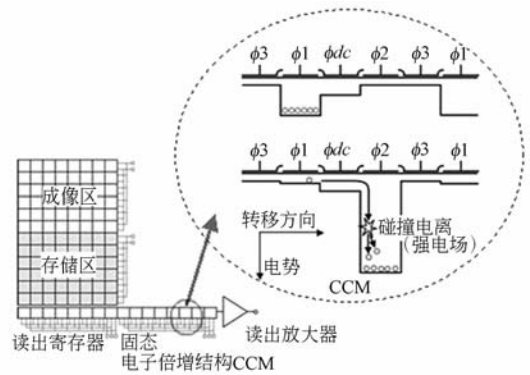


图 1 EMCCD 结构示意图

Fig. 1 Structure of EMCCD

CCM 内的电子倍增是电荷碰撞电离的过程。通过相邻电极间大压差产生的电场将信号电荷载流子加速成“热载流子”,这些“热载流子”在电极间逐级转移发生碰撞电离得到更多的载流子。这种碰撞电离是附加噪声极低的“线性雪崩”倍增过程,尽管发生的几率非常低(通常每级发生概率约为 1.0% 到 1.6%),但通过增加 CCM 级数可达到高倍增增益效果。EMCCD 的总电子倍增增益 M 可用下式计算:

$$M = (1 + g)^N, \quad (1)$$

式中: g 为每级产生的热载流子概率; N 为级数。

由于半导体材料的限制, g 值受温度影响很大,所以 EMCCD 器件的 M 值与工作温度密切相关。

2.2 EMCCD 信噪比分析

EMCCD 主要有光子霰粒噪声、暗电流噪声、读出噪声、时钟感应电荷噪声和电子倍增附加噪

声 5 种噪声来源。

光子霰粒噪声(σ_{shot})是由光的量子性决定的,具有固有特性,其大小是探测到光子数目的平方根;暗电流噪声(σ_{dark})由半导体热运动引起,与温度和积分时间相关,大小是积分时间内暗电流的平方根^[4];读出噪声(σ_{read})包括复位噪声和输出放大器噪声,是由输出浮置扩散放大器和相应处理电路产生的,读出噪声是传统 CCD 的主要噪声源;时钟感应电荷噪声(σ_{clc})由转移时钟作用下感生二次电子产生,它的值很小,通过改善转移时钟特性可抑制;电子倍增附加噪声是 EMCCD 的特有噪声,是由电子倍增过程的随机性引入到系统中的附加噪声,可定义附加噪声因子 F 来描述它,令 $F = \sigma_{\text{out}}^2 / \sigma_{\text{in}}^2 M^2$,其中 M 为电子倍增增益, σ_{out} 为积累寄存器输出信号的标准差, σ_{in} 为积累寄存器输入信号标准差。

由以上分析可推导出 EMCCD 总噪声公式:

$$N = \sqrt{\sigma_{\text{read}}^2 + F^2 M^2 (\sigma_{\text{dark}}^2 + \sigma_{\text{shot}}^2 + \sigma_{\text{clc}}^2)}, \quad (2)$$

忽略 σ_{clc} ^[5],且 $\sigma_{\text{dark}} = \sqrt{DT}$, $\sigma_{\text{shot}} = \sqrt{QP}$,则噪声公式可写作:

$$N = \sqrt{\sigma_{\text{read}}^2 + F^2 M^2 (\sigma_{\text{dark}}^2 + \sigma_{\text{shot}}^2)} = \sqrt{\sigma_{\text{read}}^2 + F^2 M^2 (DT + QP)}, \quad (3)$$

其中: M 是电子倍增增益, D 是每个像元(pixel)单位时间暗电流, T 是积分时间, Q 是量子效率, P 为入射到每个像素的光子数目。

EMCCD 的输出信号 S 是探测信号 QP 与倍增率 M 的乘积,因此,EMCCD 的信噪比公式为:

$$S/N = QP / \sqrt{\sigma_{\text{read}}^2 / M^2 + F^2 (DT + QP)}, \quad (4)$$

对比传统 CCD 信噪比公式 $S/N = QP / \sqrt{\sigma_{\text{read}}^2 + DT + QP}$ 可以发现,电子倍增增益 M 明显抑制读出噪声。虽然由于 CCM 的存在,EMCCD 对暗电流和霰粒噪声也有放大作用,但经研究表明, F 值一般仅在 1.41 左右^[6](TC285 的 F 值为 1.4),再通过高效制冷措施最大限度地减小暗电流,EMCCD 的信噪比在短积分时间的微光条件下要远高于传统 CCD。

2.3 TC285 特性分析

TC285 是 TI 公司生产的一款电子倍增

CCD,其结构是典型前照式 EMCCD 结构,在读出寄存器后是 400 级的 CCM 结构,具有低噪声、高灵敏度、高读出速率的特点。其主要参数如下^[7]:

(1) 有效像元数为 $1004(\text{H}) \times 1002(\text{V})$,像元大小为 $8 \mu\text{m} \times 8 \mu\text{m}$;

(2) 支持最大像素时钟频率 35 MHz,采用分离栅-虚相技术;

(3) 具有电子快门和抗晕结构;

(4) 典型电子倍增增益(200 倍)情况下的敏感度(Sensitivity)为 $5\ 600 \text{ V}/(\text{Lx} \cdot \text{s})$,无倍增时敏感度为 $28 \text{ V}/(\text{Lx} \cdot \text{s})$;

(5) 暗电流为 $0.005 \text{ nA}/\text{cm}^2$ ($25 \text{ }^\circ\text{C}$,积分时间 16.67 ms);

(6) 典型电子倍增时的动态范围为 72 dB。

TC285 系列分有无制冷两种型号,由于制冷可以最大限度降低 EMCCD 相机的暗电流噪声,设计使用集成了半导体制冷器的 TC285 图像传感器。

3 系统设计方案

为了满足高数据更新率的使用需要,本设计的星相机应满足在较短积分时间(小于 8 ms)内,较高拍摄帧频(10 frame/s)下,至少探测到 6 等恒星的设计要求。采用极高灵敏度换取短光积分时间,达到高帧频、高数据更新频率的效果,使用 EMCCD 在原理上即出于这样的考虑。图 2 是星相机方案设计框图。

相机接收外触发信号启动一帧的拍摄过程,并通过 SPI 接口或 RS-232 接口接收增益、偏置、积分时间等参数设置;时序控制器是系统控制中心,负责产生 CCD 工作时序信号、生成采样时序、配置视频信号处理器、生成行场等同步信号;CCD 驱动电路将 CCD 工作时序信号转换成 CCD 驱动脉冲;预放大器提高 CCD 输出视频信号的负载能力,并起到保护 CCD 的作用^[8];视频信号处理器则负责对 CCD 输出的模拟视频信号进行相关双采样和 A/D 转换。为满足不同的处理需要,图像数据可从 CameraLink 图像接口发出,或发送到数据总线上进行实时处理。

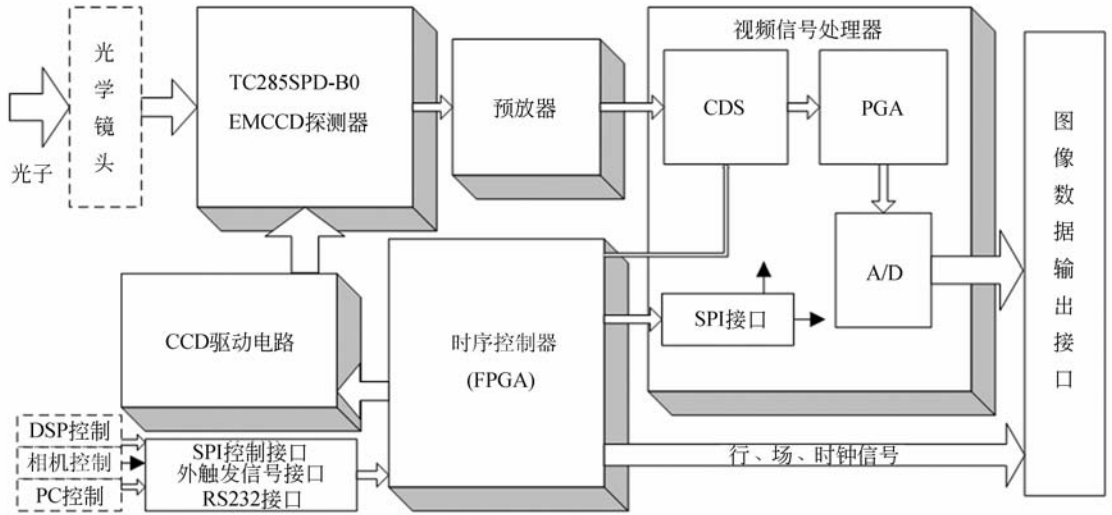


图2 方案设计框图

Fig.2 Block diagram of design

4 CCD 驱动电路设计

TC285 的驱动脉冲信号主要有垂直转移时钟、水平读出时钟、复位信号和电子倍增时钟信号四类。TC285 是采用虚相技术^[9]的两相 EMC-CD,其垂直转移时钟在成像区和存储区分别有两相(IAG1/2、SAG1/2),它们幅度的精确性对图像质量有影响^[10];而水平读出时钟和复位信号的频率较高,等于像素时钟频率;电子倍增时钟信号不但频率高而且幅度高(表现为转换速率高)。

针对上述各种驱动信号的特点,分别设计它们的驱动电路。垂直转移时钟频率不高,其驱动电路较容易实现。虽然目前驱动器芯片的输出电平最低一般只有 -5 V ,但通过二极管钳位电路可以把驱动芯片输出的低电平钳位到需要的 -5.7 V 。高频大幅信号的驱动问题是本设计需要解决的主要问题。具体来说,包括如何确保高频驱动时信号间的相位对应关系以及如何对电子倍增信号(CMG)进行高转换速率驱动这两个问题。

经实验发现,当驱动电路在 15 MHz 以上高频工作时,水平读出时钟(SRG1/2)和复位信号(RST)之间会产生相位偏差,使 CCD 读出噪声增加。这种偏差主要是由于这三个信号的上升下降沿时间不一致造成的。根据高速 CMOS 驱动器 EL7457 的开关特性,可以采用增加 EL7457 的源

极电压 V_{S+} 的方法来提高片内开关时间,通过这样的方法可以最大限度的缩短输出信号的高低电平转换时间,从而使上述三者相位关系满足设计要求。

复位等信号的驱动均采用了高速驱动芯片 EL7457 作为基本驱动器件,但是,对于电子倍增时钟信号却无法使用该芯片进行驱动。这是因为 CCM 内碰撞电离需要的强电场由 CMG 信号提供,要提供这样的电场,电子倍增时钟必须高频大幅摆动。CMG 的频率等于像素时钟频率,高低电平分别为 -3.8 V 和 22 V 左右。使用转换速率可以表示驱动电路输出大幅度高频信号的能力,当取上升沿时间 10 ns 时,信号 CMG 要求的转换速率达到 $2\ 580\text{ V}/\mu\text{s}$ 。而对于 EL7457 这类集成芯片来说,最高转换速率仅为 $1500\text{ V}/\mu\text{s}$ 左右。因此,电子倍增时钟驱动电路的设计是 EMC-CCD 驱动电路设计中的一个普遍问题。通过实验发现要实现所要求的转换速率,开关三极管开关电路和高速集成驱动芯片都很难实现,设计中采用 DMOS 开关管构成互补开关电路实现此功能。DMOS 管一般应用于大功率、高速度场合,具有响应速度快的优点。图 3 是该互补开关电路原理图和该电路在输入 20 MHz 时钟信号时的输出波形。二极管起去除响应死区的作用,电容起隔直作用。图中可见输出摆幅已达 23.8 V ,可以满足高转换速率的要求。

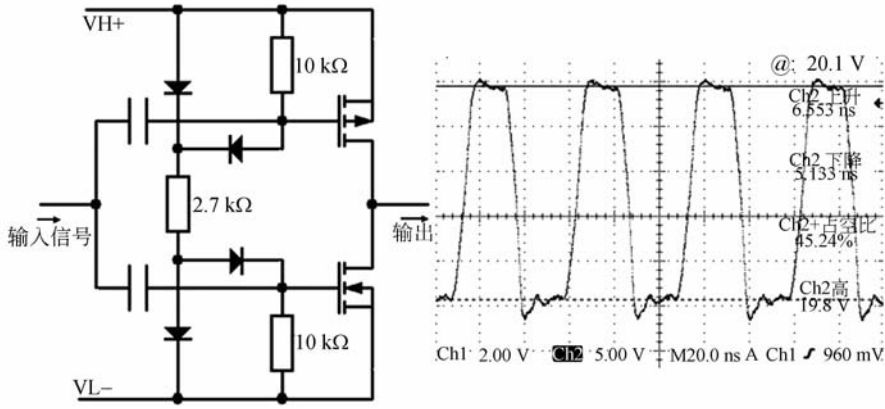


图 3 DMOS 互补开关电路及其输出波形(测量仪器: Tektronix TDS3032C 数字示波器)

Fig. 3 DMOS switch circuit and output wave(measure instrument: Tektronix TDS3032C digital oscillograph)

在相机的 CCD 驱动电路设计中,还考虑了传输线反射的问题。带载测量 CCD 各驱动信号可以发现,部分信号波形出现了过冲。这是由于传输线阻抗大于驱动端内部阻抗,信号反射产生了“振铃”现象,导致出现过冲。CCD 驱动电路设计时应避免上述现象。通过采用串联源端端接电阻的方案,可以解决这一问题。

5 视频信号处理电路设计

视频信号处理电路对 CCD 视频信号进行相关双采样(CDS)和 A/D 转换。设计采用了集成视频信号处理器 XRD9859,时序控制器根据驱动信号的相位关系产生预采样、数据采样以及相关的暗电平钳位等信号控制 XRD9859 进行相关双采样,通过对两次采样值相减实现滤除复位噪声等相关噪声的目的^[11]。经增益偏置放大电路后进行 A/D 转换。XRD9859 的配置通过 SPI 接口与时序控制器通信实现。对相机的增益偏置设置也是通过此接口。XRD9859 的量化精度为 10 bit,对于量化精度要求更高的场合,可以选用更高转换位数的 A/D 转换器。

6 系统时序设计

使用 Xilinx 的 Sparten3 系列 FPGA 构建时序控制器,负责系统的工作时序控制和接口通信。图 4 是时序控制器模块图,它说明了时序控制器的设计方案。

根据相机工作特点,把相机一帧的拍摄过程

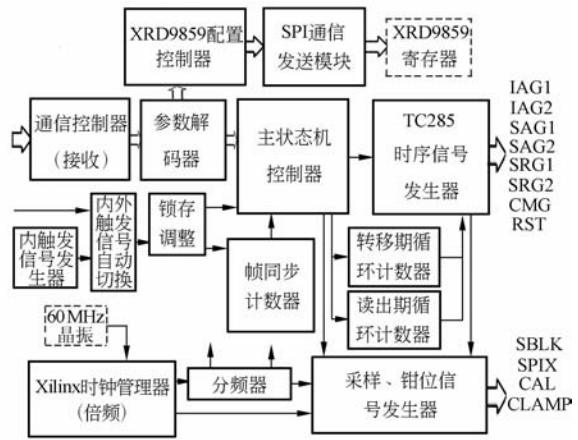


图 4 时序控制器设计框图

Fig. 4 Block diagram of timing controller

分为光积分、帧转移、串行读出与行转移、清除等待四个阶段。光积分是成像区收集电荷的过程,为了使曝光时刻与外触发时刻一致,相机接收到外触发信号后即开始光积分;帧转移是完成从成像区到存储区的转移过程^[12],由垂直转移时钟完成;行转移是将存储区中电荷向读出寄存器转移的过程,每读一行都进行一次;串行读出是把电荷从读出寄存器读出并转换成电压信号的过程^[13],在这一过程中,信号 SRG1/2 驱动读出寄存器的电荷转移,CMG 信号驱动 CCM 结构内的电荷倍增和转移,RST 使输出放大器复位。图 5 是串行读出及行转移阶段几个高频信号的仿真图,图中椭圆框内是放大后的相位关系。

除了提供 TC285 的工作时序,时序控制器还负责 XRD9859 的参数配置、生成相关双采样信号、钳位信号,同时根据 CCD 像素结构和处理

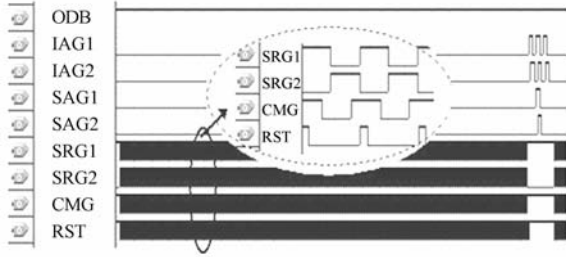


图 5 串行读出及行转移时序仿真图

Fig. 5 Logic simulation of horizontal transfer and vertical transfer

延时生成图像数据的行场同步信号。

通过分析 TC285 的像素结构和时序关系,可以计算出转移和读出时间,当像素时钟为 15 MHz 时,转移加上读出一帧的时间为 75 ms 左右,去除积分时间仍可满足 100 ms 的拍摄周期 (10 frame/s),所以相机的像素时钟定为 15 MHz。

7 实验结果与分析

7.1 探测能力实验

为了分析相机的探测能力,使用星等模拟器进行了成像实验。对星等模拟器发出的星光进行拍摄,所用星等模拟器为经过星等标校的暗背景单星模拟器。

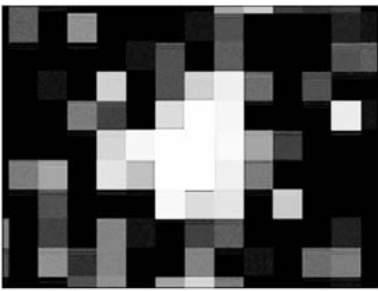


图 6 拍摄到的 6 等星星点图像(积分时间 4 ms,增益 80)

Fig. 6 Star image of Mv6(exposure time:4ms,gain:80)

图 6 是使用 30 mm 焦距、口径为 20 mm 的镜头拍摄到的 6 等星的星点图像(截取自原始图像)。拍摄时相机的参数如下:电子倍增增益约 50 倍,积分时间为 4 ms,增益为 80。

使用下式计算图像的目标信噪比:

$$SNR = \frac{S_{max} - \bar{X}}{\sigma}, \quad (5)$$

式中: S_{max} 为目标灰度峰值, \bar{X} 为图像均值, σ 为图像均方差。图 6 中 6 等星目标灰度值 $S_{max} = 368$, $\bar{X} = 16.62$, $\sigma = 8.12$,用(5)式计算得探测 6 等星时的目标信噪比为 43.27。

7.2 拍星实验

为了验证相机在自然条件下的探测能力,在长春净月潭公园进行了拍星实验。实验拍摄了部分星座,并用相关识别软件进行识别,图 7 是 8 ms 积分时间下拍摄到的小熊星座 η 星和 ζ 星的星点图像,它们的星等分别是 4.96 等和 4.27 等 (Skymap 软件星等标识),图中对应的目标灰度值分别为 768 和 1 017。通过比对星图位置可以发现 5 等以上恒星,图 8 是一颗 5.56 等星的截图,其灰度值为 240。用式(5)计算小熊座 η 星 (4.96 等)和图 8 中 5.56 等星的信噪比分别为 42.90 和 11.95。由于受大气透过率、地面杂光以及实拍星光光谱特性的影响,图 8 的目标信噪比明显低于探测能力实验的信噪比。

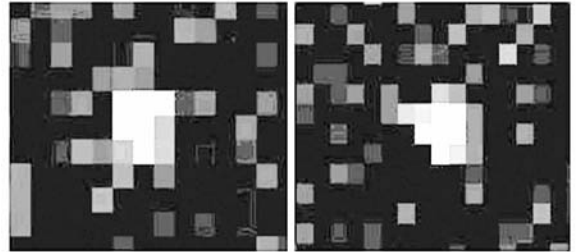


图 7 拍摄到的小熊座 η 星和 ζ 星图像 (积分时间 8 ms,增益 90)

Fig. 7 Star images of Ursa Minor's η and ζ (exposure time:8 ms,gain:90)

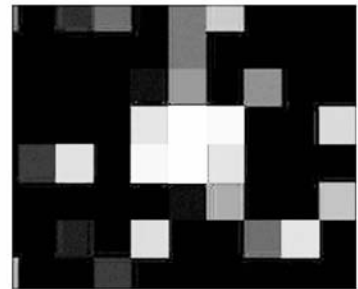


图 8 星等为 5.56 的恒星图像(积分时间 8 ms,增益 90)

Fig. 8 Star image of Mv5.56 (exposure time:8 ms,gain:90)

8 结 论

本文把 EMCCD 引入到星相机的设计中,从而提高了星相机的探测能力和数据更新速率。论述了基于 TC285 的 EMCCD 星相机的设计方案和相关实验。通过使用星等模拟器进行的探测能力实验,证明了相机在 8 ms 积分时间以内可探测

到 6 等星,且信噪比较高。通过对小熊星座等恒星的拍星实验对相机的应用做了初步的探索,实验证明相机具备在较快的数据更新率下拍摄星光图像的能力。设计的基于 TC285 的 EMCCD 星相机具有面阵大、探测能力强、信噪比高、积分时间短、数据更新快、体积小特点,十分适合短积分时间内探测微弱星光信号的应用,相信它在航天、航空等方面具有广阔应用前景。

参考文献:

- [1] 刘金国,李杰,郝志航. APS 星敏感器探测灵敏度研究[J]. 光学精密工程,2006,14(4):553-557.
LIU J G, LI J, HAO ZH H. Study on detection sensitivity of APS star tracker [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(4):553-557. (in Chinese)
- [2] 苏学征. EMCCD 技术——单光子水平的成像探测[J]. 现代科学仪器,2005(2):51-53.
SU X ZH. EMCCD technology- single photon imaging detection [J]. *Modern Scientific Instrument*, 2005(2):51-53. (in Chinese)
- [3] 张灿林,陈钱,周蓓蓓. 高灵敏度电子倍增 CCD 的发展现状[J]. 红外技术,2007,29(4):192-195.
ZHANG C L, CHEN Q, ZHOU B B. Recent progress toward ultra-sensitivity EMCCD [J]. *Infrared Technology*, 2007,29(4):192-195. (in Chinese)
- [4] 李云飞,李敏杰,司国良,等. TDI-CCD 图像传感器的噪声分析与处理[J]. 光学精密工程,2007,15(8):1196-1202.
LI Y F, LI M J, SI G L, *et al.*. Noise analyzing and processing of TDI-CCD image sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(8):1196-1202. (in Chinese)
- [5] EMCCD technical note[Z/OL]. HAMAMATSU, 2007,2. <http://www.hamamatsu.com/>.
- [6] 陈晨,许武军,翁东山,等. 电子倍增 CCD 噪声来源和信噪比分析[J]. 红外技术,2007,29(11):634-637.
CHEN CH, XU W J, WENG D SH, *et al.*. The Noise sources and SNR analysis of electronic multi-
plying CCD [J]. *Infrared Technology*, 2007, 29(11):634-637. (in Chinese)
- [7] TC285SPD-B0 1004×1002 pixel impactron tm CCD image sensor data sheet[R/OL]. <http://focus.ti.com.cn/cn/lit/ds/symlink/tc285spd-b0.pdf>
- [8] 薛旭成,李云飞,郭永飞. CCD 成像系统中模拟前端设计[J]. 光学精密工程,2007,15(8):1191-1195.
XUE X CH, LI Y F, GUO Y F. Design of analog front end of CCD imaging system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(8):1191-1195. (in Chinese)
- [9] Interlace operation in TI Virtual-Phase CCD image sensors[R/OL]. <http://focus.ti.com.cn/cn/lit/an/soca009/soca009.pdf>
- [10] TC285 application note[R/OL]. http://web.tij.co.jp/jsc/docs/disp/eng/impact/pdf/TC285_App_Note.pdf
- [11] 佟首峰,阮锦,郝志航. CCD 图像传感器降噪技术的研究[J]. 光学精密工程,2000,8(2):140-145.
TONG SH F, RUAN J, HAO ZH H. Noise reducing scheme on output signal of CCD [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000,8(2):140-145. (in Chinese)
- [12] GERALD C H. *CCD Arrays Cameras and Displays* [M]. SPIE Optical Engineering Press, 1998.
- [13] 金龙旭,李国宁,刘妍妍. 帧转移型面阵 CCD 驱动电路的设计[J]. 光学精密工程,2008,16(6):1140-1145.
JIN L X, LI G N, LIU Y Y. Design of driving circuit for frame transfer area CCD [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(6):1140-1145. (in Chinese)

作者简介:



何家维(1982—),男,黑龙江虎林人,研究实习员,2005年于哈尔滨工程大学获学士学位,主要从事 CCD 成像技术、数字图像处理等方面的研究。E-mail: hejiawei3650@163.com



魏仲慧(1961—),女,吉林长春人,研究员,博士生导师,1983年于吉林大学获学士学位,主要从事数字图像存储、光电测量设备等方面的研究。E-mail: wzhlpv@sohu.com



耿玉芝(1938—),女,山西蛟城人,研究员,主要从事 CCD 成像技术、遥感成像技术等方面的研究。E-mail: gengyuzhi@hotmail.com

导师简介:



何昕(1966—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,1988年于哈尔滨工业大学获学士学位,1991年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获硕士学位,主要从事数字图像处理、光电测量设备等方面的研究。E-mail: hexin6627@sohu.com

通讯作者:



王一凡(1958—),男,吉林长春人,研究员,1991年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获硕士学位,主要从事精密机械制造与检测方面的研究。E-mail: wangyifan1958@163.com

● 下期预告

亲/疏水性不同壁面组成微通道 深宽比与通道内自发毛细流动

邓永波^{1,2},张平¹,杜新^{1,2},胡亮红^{1,2},吴一辉¹,刘震宇¹,刘永顺¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室,吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院,北京 100039)

在聚合物芯片上,由亲疏水性不同的壁面组成的微通道普遍存在,为了顺利实现该类微通道内的自发毛细流动,和对被操作液体的自发毛细输运,本文根据系统总表面自由能极小原理,在功能关系的基础上,提出了微通道内毛细输运自发实现的临界深宽比条件。在以 PDMS 和玻璃为材料的微流控芯片上进行了三面疏水一面亲水的微通道内毛细输运实验,在 165 μm 、200 μm 和 265 μm 三种深度的通道内,理论计算的临界深宽比为 0.5,而实验得到的值为 0.471 4、0.487 8 和 0.481 8。实验结果与理论预测结果的相对误差分别为 5.720%、2.440% 和 3.640%,得到了与理论计算基本一致的结果,从而验证了由亲疏水性不同的壁面组成的微通道内毛细输运自发实现的临界深宽比条件。