

文章编号 1004-924X(2018)12-3019-09

# 高灵敏度 EMCCD 导航相机的设计

何家维<sup>1\*</sup>, 何 昕<sup>1</sup>, 魏仲慧<sup>1</sup>, 穆治亚<sup>1</sup>, 李方彪<sup>1,2</sup>

(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:** 导航相机是深空探测领域中关键的导航敏感部件, 本文通过提高导航相机的灵敏度来提高导航相机的综合性能, 特别是提高时间分辨率, 解决高动态条件下的目标探测问题。首先, 根据导航相机的工作模式和 EMCCD 的性能特点, 分析了影响导航相机成像质量的多个因素, 建立了目标信噪比理论分析模型; 然后, 在理论计算基础上, 重点研究 EMCCD 导航相机的样机设计技术, 说明了 EMCCD 高频高幅驱动、模拟前端设计、TEC 真空制冷、时序控制与数据处理等关键技术的实现方法; 最后, 介绍了相关实验工作, 并分析实验数据。实验结果表明: 样机最大目标信噪比在倍增增益  $M=10$  时达到 68.6 dB, 在口径 13 mm 条件下, 可在积分时间 1 ms 内实现对月球成像。基本满足深空探测导航相机高动态条件下短积分时间成像的要求。

**关键词:** 深空探测; 导航相机; 电子倍增电荷耦合器件; 高动态; 小天体

中图分类号: TN386.5 文献标识码: A doi: 10.3788/OPE.20182612.3019

## Design of high-sensitivity EMCCD navigation camera

HE Jia-wei<sup>1\*</sup>, HE Xin<sup>1</sup>, WEI Zhong-hui<sup>1</sup>, MU Zhi-ya<sup>1</sup>, LI Fang-biao<sup>1,2</sup>

(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)*

\* *Corresponding author, E-mail: hejiawei3650@163.com*

**Abstract:** The navigation camera is a sensitive component that is crucial for deep space exploration. This report describes a method for the comprehensive improvement of the performance of such a camera by increasing their sensitivity. In particular, the approach improves the temporal resolution of this instrument and simultaneously solves the target detection problem under high dynamic conditions. Firstly, the imaging quality of a navigation camera is analyzed according to the operating mode and the performance characteristics of an Electron Multiplying Charge-Coupled Device (EMCCD). In addition, a theoretical model of a target's signal-to-noise ratio (SNR) is established. Secondly, the study focused on the design method for an EMCCD navigation camera. Key technologies are illustrated such as the high-frequency high-amplitude drive circuit of an EMCCD, analog front circuitry, TEC vacuum cooling, timing control, and data processing. Finally, the experimental results show that the optimal

收稿日期: 2018-01-10; 修订日期: 2018-03-20.

基金项目: 中国科学院知识创新工程领域前沿项目资助 (Supported by CAS Innovation Program)

target SNR is 68.6 dB at  $M = 10$  and that the moon can be imaged using an integration time of 1 ms with a 13 mm aperture. The navigation camera satisfies the requirements of short integration time imaging under the high dynamic conditions associated with deep space exploration.

**Key words:** deep-space exploration; navigation camera; Electron-Multiplying Charge-coupled Device (EMCCD); high dynamic; small celestial bodies

## 1 引言

深空探测对人类持续生存和外空间拓展有重要现实意义<sup>[1]</sup>。21 世纪各航天大国都制定了深空探测规划,我国也启动探月工程、火星探测计划等任务。在这些任务中,探测器精确导航与控制问题是必须解决的技术难题<sup>[2]</sup>。深空探测任务航程远、时间长,传统基于无线电跟踪的导航方法虽可靠性高、鲁棒性好,但实时性差、且必须依赖地面测控网,无法满足飞越、绕飞、交会等特殊任务阶段的导航要求。因此,深空探测器一般会配置光学导航相机用于特定飞行阶段的导航,例如美国深空 1 号的 MICAS、欧洲罗塞塔任务的 OSIRIS、美国深度撞击任务中的 MRI 和 HRI 等<sup>[3-5]</sup>,采用导航相机的光学导航方法可提高深空探测器的自主导航能力,是深空探测中最重要的导航方法之一<sup>[6]</sup>,可以说导航相机性能的提升对深空探测器精确导航与控制技术水平的提高具有重要意义。

导航相机是深空探测器对特定天体目标拍摄完成导航和科学图像采集功能的光学成像系统。在深空探测的不同阶段,导航相机任务不同,巡航段一般采取基于小行星图像信息导航方式,这时拍摄对象为信标小行星和恒星背景;接近交会段通常采取基于目标天体视线矢量的导航方式,这时拍摄对象为目标天体;绕飞或着陆段,导航方式更加复杂,导航相机应拍摄到目标天体的清晰图像,并分析图像特征,为自主导航提供有效观测数据。虽然拍摄目的不同,但导航相机的拍摄对象均为暗弱目标,提高导航相机的灵敏度将显著改善其性能:首先,提高灵敏度可缩短积分时间,即可避免长积分时间下的运动模糊<sup>[7]</sup>,又可提高时间分辨率,满足探测器变轨机动情况下的实时性导航要求;其次,提高灵敏度可使相机拍摄到更高星等的恒星,增加视场内可探测恒星数量,有利于星识别计算;再次,高灵敏度导航相机的光学系统口径可减小,有利于轻小型化设计。由于这些原

因,在不增加光学系统复杂度的前提下,如何提高导航相机的灵敏度以实现超短积分时间的探测,是本文的研究重点。

传统导航相机一般采用科学级 CCD 作为成像器件<sup>[8]</sup>,这限制了灵敏度的进一步提高。本文尝试应用目前灵敏度最高的电子倍增电荷耦合器件(Electron-Multiplying Charge-coupled Device, EMCCD)来提高导航相机探测能力。EMCCD 成像系统不仅要设计稳定可靠的高频高幅驱动电路而且要进行制冷,这些技术难点都增加了 EMC-CD 成像系统在导航相机中的设计难度。本文尝试将 EMCCD 成像技术应用于深空探测导航领域,并采用背照式 EMCCD 器件设计了高灵敏度、具备目标提取等数据处理能力的地面原理样机,同时完成了相关实验工作。

## 2 EMCCD 导航相机探测能力分析

### 2.1 EMCCD 原理与选型

EMCCD 的工作原理是基于“电荷碰撞电离”效应<sup>[9]</sup>,外加高压脉冲驱动电荷在固态电子倍增结构内移动,被加速成“热载流子”在受控电极间逐级转移并发生碰撞电离得到更多载流子,从而实现电子倍增。EMCCD 每级产生的“热载流子”概率与温度密切相关,因此芯片温度越低 EMCCD 倍增倍数也就越大。EMCCD 信号电荷进入读出放大器前先进行了上述倍增过程,所以能够抑制传统 CCD 读出噪声,灵敏度得到大幅提高。EMCCD 的灵敏度一般可达到传统 CCD 的几百倍,具有体积小、寿命长、积分时间短、分辨率高的优点。

目前 EMCCD 传感器芯片主要由英国 E2V 公司生产,有前照式和背照式两种,背照式的量子效率更高,可达到 90% 以上。本文选择 CCD201-20BI 作为导航相机的成像器件。其主要技术特点有:大面阵  $1\ 024(H) \times 1\ 024(V)$ ;背照式结构,量子效率在 500 nm 至 650 nm 高达 90% 以上;电

子倍增增益最高达到 1 000 倍;填充因子为 100%;满阱电荷  $80ke^-$ ;EMCCD 噪声附加因子 1.4。CCD201-20BI 在像元数、量子效率、动态范围等方面均处于 EMCCD 最领先水平,能够满足导航相机的应用需求。在下文中,将以此器件参数建立目标信噪比分析模型,说明 EMCCD 成像技术对导航相机探测能力的影响。

### 2.2 EMCCD 导航相机探测信噪比模型

导航相机对暗弱目标成像时,噪声决定了可

探测最小信号,要分析导航相机的灵敏度,建立信噪比分析模型是关键。本文采用目标信号强度所对应的信噪比即目标信噪比来衡量导航相机的灵敏度。如图 1 所示,从光学系统、目标特性、电子学成像系统、背景环境等这几个方面确定关键参数,建立 EMCCD 导航相机的目标信噪比分析模型。图中左侧为各方面影响因素,它们相互作用可以得到 EMCCD 导航相机的目标信噪比,目标信噪比决定了相机的探测极限。

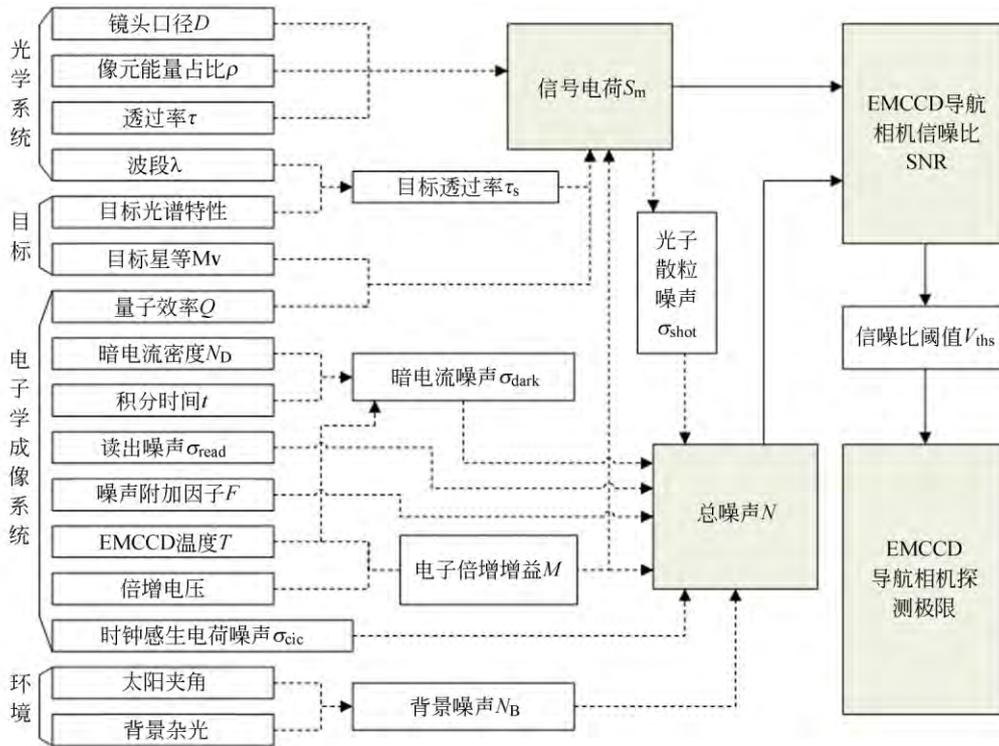


图 1 EMCCD 导航相机目标信噪比分析模型

Fig. 1 SNR model of EMCCD navigation camera

EMCCD 导航相机的噪声主要由光子霰粒噪声、背景噪声、暗电流噪声、读出噪声、时钟感生电荷噪声组成。噪声各自成因不同,光子霰粒噪声是由光的量子性决定的,是光电成像系统的固有噪声;暗电流噪声由半导体热运动引起,与温度密切相关,在本设计中,通过制冷方法对其抑制;读出噪声是传统 CCD 器件的主要噪声源,EMCCD 成像系统由于倍增结构的存在,可以显著抑制读出噪声;时钟感生电荷噪声由转移时钟感生二次电子产生,通过改善电路性能加以抑制后可忽略;噪声附加因子  $F$  用于描述电子倍增附加噪声,这是 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,令  $F = \sigma_{out}^2 / \sigma_{in}^2 M^2$ ,

其中  $M$  为电子倍增增益,  $\sigma_{out}$  为积累寄存器输出信号的标准差,  $\sigma_{in}$  为积累寄存器输入信号标准差。综上所述,EMCCD 导航相机的总噪声可用式(1)表示:

$$N = \sqrt{\sigma_{read}^2 + F^2 M^2 (\sigma_{dark}^2 + \sigma_{shot}^2 + \sigma_{cic}^2 + \sigma_{NB}^2)}. \quad (1)$$

导航相机对暗弱目标的探测能力主要受光学系统口径、积分时间、量子效率等因素影响,为了定量分析目标信噪比,本文将目标强度对应成星等,并用式(2)表示信号强度:

$$S_m = M \cdot \rho \cdot \tau_s \cdot E_0 \cdot 2.512^{-m} \cdot \frac{\pi}{4} D^2 \cdot t \cdot \frac{1}{E_{ph}} \cdot Q. \quad (2)$$

综上所述,EMCCD 导航相机目标信噪比可用式(2)和式(3)表示:

$$SNR = \frac{S_m}{N} = \frac{S_m}{\sqrt{F^2 \cdot S_m + F^2 \cdot N_D \cdot t + \frac{\sigma_{read}^2}{M^2}}}, \quad (3)$$

式(2)与式(3)中,  $E_0$  为零等星的辐照度,  $E_{ph}$  为普朗克常量, 其它参数的含义见图 1。为分析方便, 在规避杂光影响情况下, 式(3)中忽略了背景噪声和时钟感生电荷噪声。

式(3)给出了图 1 中各方面因素与 EMCCD 导航相机目标信噪比的定量关系。式中,  $\sigma_{read}^2/M^2$  一项说明了 EMCCD 对读出噪声的抑制作用,  $M$  越大抑制作用越明显,  $F^2 N_D t$  一项则说明了 EMCCD 对暗电流噪声的放大作用。因此, EMCCD 成像系统应采取制冷方法对暗电流噪声进行抑制。

### 2.3 EMCCD 导航相机的探测极限

利用式(3)定量分析 EMCCD 导航相机的探测能力。出于交会捕获小天体的需要, 导航相机光学系统一般具有焦距长、口径大的特点, 本文取口径 120 mm 进行分析。像元能量占比  $\rho$  取 0.3, 目标透过率  $\tau_s$  取 0.8, 0 °C 时 CCD201-20BI 的暗电流密度  $N_D$  为  $50e^-/\text{pixel}/s$ , 读出噪声为  $43e^-$ , 量子效率取 90%, EMCCD 特有的  $F=1.4$ , 倍增增益  $M$  与温度和倍增电压有关, 此处取  $M=500$ 。将各参数带入式(2)与式(3)计算对应不同积分时间下对不同星等恒星探测的目标信噪比。设在探测率大于 99.9%, 虚警率小于 0.1% 时相机实现有效探测, 相关文献已论证这时信噪比阈值为 8.1<sup>[11]</sup>。按照此判据计算结果如图 2 曲线, 此曲线给出了在不同积分时间下 EMCCD 导航相机能够完成探测率大于 99.9%, 虚警率小于 0.1% 有效探测的极限星等。

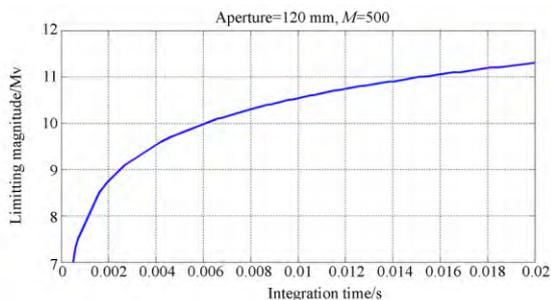


图 2 EMCCD 导航相机星等探测极限

Fig. 2 Detection limit of EMCCD navigation camera

由上述分析可知, 在给定光学系统条件、电子倍增增益 500 倍时, 本文导航相机方案探测到 10Mv 等星理论上仅需 6 ms 的积分时间。在此条件下, 采用普通科学级 CCD 传感器的导航相机探测 10Mv 星一般需要 20 ms 左右。本方案将传统导航相机的探测积分时间缩短了近 3 倍, 采用这种方式可改善探测器与目标天体快速交会时相对运动引起的图像拖影模糊问题<sup>[12-14]</sup>, 从而降低目标提取难度、提高测量精度。

## 3 EMCCD 导航相机的样机设计

### 3.1 系统组成

在保证信噪比的前提下, 对暗弱目标短积分时间成像是样机设计的主要目标, 本文通过对时序控制、脉冲驱动、制冷导热、噪声抑制等几方面关键技术的研究实现此目标。如图 3 所示, EMCCD 导航相机样机由光学系统、机械结构和电子学部分组成, 其中电子学部分由焦平面板、时序控制板和数据处理板组成。焦平面板主要包括 EMCCD 传感器及其驱动电路、模拟前端电路等, 这部分电路是 EMCCD 成像系统设计的重点和难点; 时序控制板以 FPGA 为核心, 主要提供 EMCCD 工作时序, 并进行图像的缓存和预处理; 数据处理板以 DSP 为核心, 主要作用是目标提取, 输出恒星质心或小行星中心的坐标。同时设计的地面检测设备, 主要由配置了采集卡的工控机组成, 用于相机输出图像和数据的采集分析。

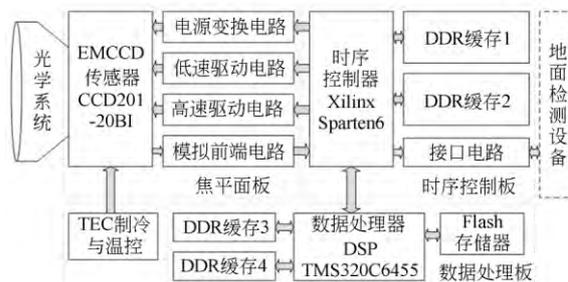


图 3 EMCCD 导航相机样机的系统组成

Fig. 3 Block diagram of EMCCD camera

### 3.2 EMCCD 驱动电路设计

EMCCD 利用脉冲间相位变化转移电荷, 与普通 CCD 相比, EMCCD 的脉冲具有工作频率高、频率不恒定、幅度变化范围极大的特点, 因此

高频率高幅度的驱动电路一直是 EMCCD 成像电路的设计难点。考虑驱动电路要在极短时间(通常为纳秒级)内把信号幅度放大到规定水平,设计难度与输出频率和幅值都相关,本文引入模拟电路中的转换速率的概念来评估脉冲信号对驱动电路的性能要求,转换速率反映了驱动电路对快速变化方波信号的响应能力,按照这一标准可将 EMCCD 导航相机的驱动电路划分为低速驱动电路和高速驱动电路,这里的低速和高速是指转换速率而非单一的频率。

CCD201-20BI 传感器的驱动脉冲信号共有 6 类 14 路,水平转移与垂直转移等大部分脉冲转换速率小于  $2\ 000\ V/\mu s$ ,这类信号采用 EL7156 集成驱动芯片设计了低速驱动电路来实现驱动。CCD201-20BI 电子倍增脉冲(RΦ2HV)低电平为 +4 V,高电平最高 +50 V,工作频率 5~15 MHz,转换速率高达  $4\ 600\ V/\mu s$ ,RΦ2HV 信号对转换速率的要求远超出集成驱动芯片的能力,可利用分立元件设计高速驱动电路实现 RΦ2HV 信号的高频高幅驱动。本文设计了互补场效应管开关电路和钳位电路组合的方法来实现 RΦ2HV 信号的高频高幅驱动。

高速驱动电路由两只场效应管轮流导通实现脉冲驱动,提供摆幅为 46 V 的脉冲。通过钳位电路把输出脉冲低电平钳位到 +4 V,使高电平抬升到 +50 V 左右。这样可避免采用高压电源,提高相机的可靠性。与场效应管加变压器的驱动电路相比,这种方案具有相位精确可控、体积小、工作稳定的优点。

### 3.3 模拟前端电路设计

模拟前端电路的作用是对 EMCCD 输出模拟信号进行缓存、放大、降噪等处理,然后在采样及控制脉冲的作用下完成模数转换,输出数字图像。如图 4 所示,模拟前端电路由输出负载、预放大器、前置放大器和视频信号处理器组成。

为降低热损耗,CCD201-20BI 传感器输出负载没有集成在芯片内部,需在芯片外设计负载。为避免 EMCCD 输出放大器直流工作点偏移,本设计采用镜像恒流源电路取代电阻作为负载,可为 CCD201-20 的两个输出放大器分别提供 5 mA 和 7.5 mA 的恒定电流;由高频三极管 3DG122 构建射极跟随电路作为预放大器,实现阻抗匹配器与下一级电路相连,同时可保护 EMCCD 输出级

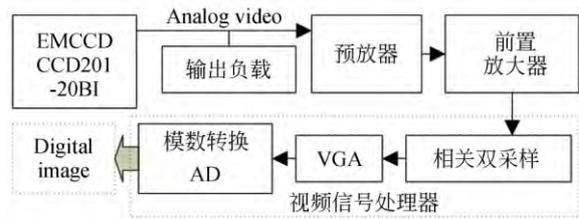


图 4 模拟前端电路的组成

Fig. 4 Block diagram of analog front-end circuit composition

放大器;通过采用 AD9845B 集成芯片整合相关双采样、增益放大(VGA)和 A/D 转换等功能,组成视频信号处理电路最后输出 12 bit 数字图像,这样可降低分立元件构建视频信号处理电路的噪声风险。

模拟前端是模数混合电路,不恰当的电路或 PCB 设计将引入过量干扰和噪声。本文没有采用在混合电路中传统的模数远端接地方法,而是在信号完整性仿真的基础上,采用地平分区不分割的接地方法。将统一地平分为模拟区和数字区,模拟信号只在模拟区内布线,数字信号只在数字区内布线,这种方法可避免电流回流引起的数字信号干扰模拟信号的问题。

### 3.4 时序控制与数据处理电路设计

时序控制和数据处理电路是 EMCCD 导航相机的控制与处理中枢。由 FPGA 与 TMS320C6455 硬件平台实现,DDR 存储器进行图像的缓存,导航相机的时序生成、图像处理、对外通讯均以 FPGA 为主进行,DSP 仅为 FPGA 提供运算支持。图 5 为时序控制与数据处理部分的原理框图。

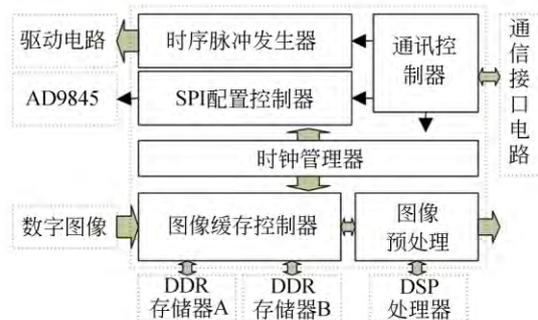


图 5 时序控制与数据处理电路模块图

Fig. 5 Block diagram of timing control and data processing

时序脉冲发生器产生 EMCCD 垂直转移时

钟、水平转移时钟、读出时钟等各路时序信号,并保证相关双采样信号与时序脉冲间的关系。以硬件描述语言编写状态机实现时序发生。由于 CCD201-20BI 没有电子快门,设计通过重复帧转移方式来清除不需要的电荷以控制积分时间。图像缓存控制器将图像乒乓缓存至两片 DDR3 存储器内,以便图像预处理模块读取图像进行处理。

图像预处理模块进行实时化噪声抑制和二值化分割,输出待处理像素坐标与灰度给 DSP 处理器进行目标提取。导航相机由通讯控制器接收主控计算机指令,根据不同飞行阶段来设置不同处理模式。在深空探测器的巡航段,以探测星点目标为主,此时直接对星图进行基于动态阈值的二值化分割,然后由 DSP 完成连通性分析剔除大目标、孤立点等干扰,最后输出星点质心坐标;在接近交会段,目标行星像元占比较大,采用 FPGA 提取行星的边缘,由 DSP 拟合出行星中心;在绕飞或着陆段,要求拍摄到目标天体的清晰图像,这一阶段主要由 FPGA 实现图像增强,并利用硬件实时提取的相应的图像特征。

### 3.5 TEC 制冷组件设计

EMCCD 的倍增结构产生“热载流子”概率与温度密切相关,芯片温度越低 EMCCD 倍增倍数也就越大,温度变化时倍增增益也将变化。因此,EMCCD 成像系统必须设计制冷温控电路,一方面抑制暗电流噪声,另一方面使 EMCCD 传感器的温度保持在恒定低温区,以便维持稳定的高增益。传统的斯特林制冷、液氮制冷都不适用于深空探测器的应用环境,本文采用 TEC 制冷(热电制冷)技术解决这一问题。通过在热电制冷器两端加载直流电压,使热量流动,传感器一端(冷端)温度会降低,另一端(热端)的温度会相应上升。将热端热量引到深空探测器冷面进行散热,即可实现 EMCCD 传感器制冷的目的。为了验证这一方法,本文在 EMCCD 导航相机地面样机中设计了真空杜瓦和风冷换热器,用于制冷组件的地面验证。

如图 6 所示,TEC 制冷组件由杜瓦组件、换热组件、截止阀、温控电路等部分组成。杜瓦组件采用气密设计,中心设置窗口玻璃,EMCCD 芯片及相关电路、热电制冷器、温度传感器安装于杜瓦组件内部。采用分子泵抽真空后,关闭截止阀后可长期保持杜瓦组件内真空度为  $10^{-4}$  Pa。半导

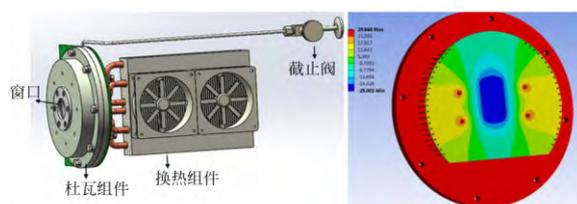


图 6 TEC 制冷组件与热分析结果

Fig. 6 TEC components and thermal analysis results

体制冷片安装于 EMCCD 芯片背部,通过导冷块和外部的换热组件连接,缝隙填充导热硅脂。

真空半导体制冷组件工作时,半导体制冷器将 EMCCD 芯片上的热量通过导冷块转移至换热器组件,EMCCD 芯片温度可由温度传感器实时测量并通过继电器控制热电制冷器通断来实现控温。杜瓦组件的热仿真分析结果如图 6,在模拟 10 W 负载情况下,传感器芯片安装于蓝色区域温度可达  $-25$  °C(彩图见期刊电子版)。

## 4 实验与分析

### 4.1 微光成像实验

相机成像功能以及真空制冷对 EMCCD 电子增益的影响。由于相机灵敏度极高,实验采用微光成像测试的方法进行。导航相机对平行光管成像,目标为分辨率板,实验现场与实拍图像如图 7 所示。

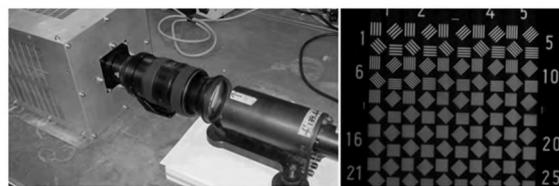


图 7 微光成像实验现场与样机实拍图像

Fig. 7 Low-light-level imaging experiment and image

图 7 中实拍图像的拍摄条件为:目标光照度  $1.6 \times 10^{-3}$  Lux,镜头 250 mm/f32(口径约 8 mm),积分时间 6 ms,电子倍增增益 50 倍,制冷  $-25$  °C。本实验采用某型普通科学级 CCD 相机进行了对比实验,其对同等亮度目标成像所需积分时间约为 300 ms,而 EMCCD 导航相机仅需 6 ms 的积分时间。可见,在 TEC 制冷器开启的情况下,EMCCD 相机电子倍增增益稳定且增益值比室温下提高显著,相机短积分时间拍摄能力增强。

### 4.2 成像信噪比实验与数据分析

目前,对空间导航相机的成像质量评价的方法没有统一的标准,根据深空探测任务不同,成像评价方法可能也不尽相同。为了定量测试 EMC-CD 导航相机样机的成像质量,考虑到导航相机以目标提取为主的使用方式,本文定义最大目标信噪比和系统信噪比两个指标来评价样机的成像性能。可用下列公式定义导航相机的最大目标信噪比  $SNR_{max}$  和系统信噪比  $SNR_{sys}$  :

$$SNR_{max} = 20\log\left(\frac{S_{max} - \bar{X}}{\sigma}\right),$$

$$SNR_{sys} = 20\log\left(\frac{S_{max}}{\sqrt{\frac{\sum_{j=0}^{M-2} \sum_{i=0}^{N-1} [X(i+1, j) - X(i, j)]^2}{M \cdot (N-1)}}}\right),$$

式中:  $S_{max}$  为相机 12 bit 量化最大值 4 095;  $\bar{X}$  为

暗场图像均值,  $\sigma$  为暗场图像标准差,  $X(i, j)$  为第  $i$  行、第  $j$  列的暗场像素灰度值,  $M \times N$  为图像分辨率。最大目标信噪比表征了导航相机探测星点目标时所能达到的最高信噪比;系统信噪比表征了系统随机噪声对图像质量的影响,一定程度上反映了成像细节的优劣。

测试方法为在暗室内采集暗场图像。分别在制冷  $-25\text{ }^\circ\text{C}$  和室温条件下对应不同电子倍增增益 ( $M$ ), 在 10 ms 积分时间下各拍摄 20 幅暗场图像,取平均值。实验结果数据如表 1 所示。

分析数据可发现,EMCCD 导航相机的信噪比与制冷温度、电子倍增增益密切相关,制冷对相机动态范围和信噪比的提升作用是显著的。 $-25\text{ }^\circ\text{C}$  时,最大目标信噪比在  $M=10$  时达到 68.6 dB,最高系统信噪比达到 70 dB。

表 1 信噪比测量结果

Tab. 1 Results of SNR measurement

非制冷 $20\text{ }^\circ\text{C}$			制冷 $-25\text{ }^\circ\text{C}$		
倍增增益 $M$	$SNR_{max}/\text{dB}$	$SNR_{sys}/\text{dB}$	倍增增益 $M$	$SNR_{max}/\text{dB}$	$SNR_{sys}/\text{dB}$
2.5	61.5	63.4	5	68	69.6
5	60.3	61.2	10	68.6	70
7.5	54.7	56.5	20	67	68.5
10	31	36	50	55.6	55.8

### 4.3 外场成像实验

为进一步验证 EMCCD 导航相机性能,使用样机进行了对恒星和月球的外场观测实验。为避免杂光影响,选择晴朗夜晚在无城市杂光影响的郊外进行了相关实验。拍星实验使用了焦距 200

mm、口径 72 mm 的定焦镜头,视场为  $4^\circ \times 4^\circ$ ,相机积分时间 10 ms。将导航相机固定于三轴转台,引导对指定天区成像,将拍摄的星图导入星识别软件进行识别,部分识别结果数据如表 2 所示。图 8 是其中 8.957  $M_V$  恒星放大截图与灰度分布。

表 2 实拍星图识别结果

Tab. 2 Results of star identification

帧号	星号	星等	靶面横坐标 $x$	靶面纵坐标 $y$	赤经 $\alpha$	赤纬 $\beta$
1	120 192	8.957	938.392 39	843.500 000	322.971 039	86.764 305
	20 064	8.948	565.000 00	257.509 430	309.697 998	89.406 509
	117 743	8.900	206.000 00	407.681 427	42.246 227	88.660 957
2	118 987	8.936	457.621 21	367.000 000	180.832 596	83.381 760

分析星图识别结果数据,实验中已识别的最高星等为 8.957  $M_V$ ,这是由于识别软件星库最高星等为 9  $M_V$ ,探测到的部分更暗的恒星没有被识别。分析 8.957  $M_V$  恒星的灰度分布,其信噪比约为 10,满足目标提取的要求。考虑到此实验中

采用的镜头口径较小且有大气透过率的影响,EMCCD 导航相机的实际探测能力应更强。

对月球的拍摄主要验证 EMCCD 导航相机短积分时间的探测能力。实验采用 400 mm 焦距、口径 13 mm 镜头,实拍图像与灰度分布如图 9 所示。

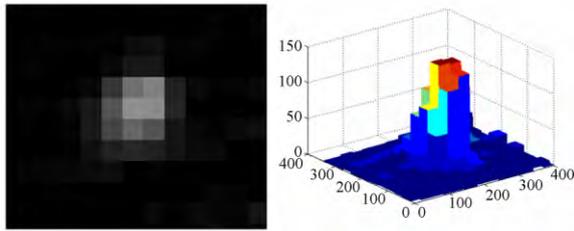
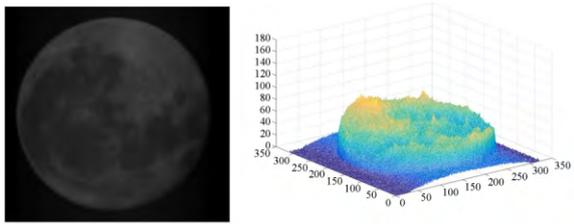


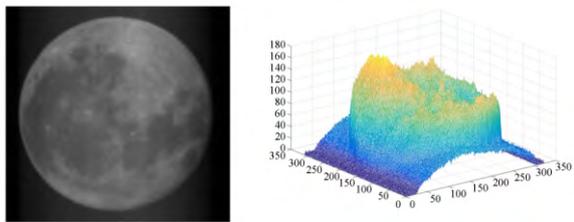
图8 实拍恒星放大截图与灰度分布(8.957 Mv)

Fig. 8 Image of 8.957 Mv star and the grayscale distribution



(a)积分时间 2 ms、 $M=10$  条件下拍摄的月球图像

(a) Moon shot within 2 ms integration time and  $M=10$



(b)积分时间 1 ms、 $M=50$  条件下拍摄的月球图像

(b) Moon shot within 1 ms integration time and  $M=50$

图9 实拍月球图像

Fig. 9 Real image of the moon

在图9中,(a)为积分时间 2 ms、倍增增益  $M=10$  条件下拍摄,(b)为积分时间 1 ms、倍增增益  $M=50$  条件下拍摄。通过实验可知,本文设计的 EMCCD 导航相机可在 1~2 ms 积分时间内完成对月球的探测,并且这种探测是在使用口径仅为

13 mm 的镜头条件下完成的,如果增加口径则积分时间可进一步缩短,这有利于探测器动态条件下的高精度快速测量。图 9(b)虽然积分时间仅为 1 ms,但由于电子倍增增益  $M=50$ ,其信噪比明显高于积分时间 2 ms 的图 9(a),因此在较短积分时间前提下,EMCCD 导航相机的电子倍增增益对信噪比的影响更大。

## 5 结 论

为了实现提高深空探测导航相机灵敏度的目的,本文将 EMCCD 成像技术应用到导航相机的设计中,根据导航相机的工作模式和 EMCCD 的特点建立 EMCCD 导航相机目标信噪比分析模型,确立了 EMCCD 导航相机性能评价的理论依据。在理论研究基础上,本文采用新型背照式 EMCCD 作为核心成像器件设计了原理样机,文中重点研究了 EMCCD 高频高幅驱动、模拟前端电路设计、真空 TEC 制冷等几项技术难题。设计的样机最大目标信噪比在  $M=10$  时达到 68.6 dB,最高系统信噪比达到 70 dB。样机可在超短积分时间内探测暗弱目标,经外场成像实验验证,10 ms 积分时间内对 8.957 Mv 恒星的探测目标信噪比达到 10(口径 72 mm),并可在积分时间 1 ms 内实现对月球成像(口径 13 mm)。

本文通过应用 EMCCD 成像技术,提高导航相机灵敏度,使导航相机具备高动态条件下的探测能力,并提高了相机短积分时间下的信噪比。样机成像实验说明本文设计的高灵敏度 EMCCD 导航相机设计方案在能够满足大部分深空探测器的导航拍摄需求,具有广泛的应用价值。本文的研究工作主要专注于导航相机硬件系统的实现和成像质量的提高,本文构建了图像处理的实时化硬件平台,实现了恒星目标的提取,对小天体中心定位、天体表面特征提取等算法等将是下一步研究工作的重点。

## 参考文献:

- [1] 王新龙. 太空战略的“北极星”——深空探测自主导航技术的发展趋势预测[J]. 人民论坛,2017,(5): 46-53+95.  
WANG X L. The "Polaris" of space strategy—pros-

pect of the autonomous navigation technology for deep space exploration[J]. FRONTIERS, 2017, (5):46-53+95. (in Chinese)

- [2] 崔平远. 深空探测:空间拓展的战略制高点[J]. 人民论坛,2017,(5):13-18.  
CUI P Y. Deep space exploration: the strategic a-

- pex of spatial expansion[J]. *Frontiers*, 2017, (5): 13-18. (in Chinese)
- [3] 薛喜平,张洪波,孔德庆. 深空探测天文自主导航技术综述[J]. *天文研究与技术*, 2017, 14(3): 382-391. XUE X P, ZHANG H B, KONG D Q. An overview of celestial autonomous navigation technology for deep space exploration[J]. *Astronomical Research and Technology*, 2017, 14(3): 382-391. (in Chinese)
- [4] NIKOS M, DANIEL G K, STEPHEN P S. Autonomous navigation for the deep impact mission encounter with comet temple 1[J]. *Space Science Reviews*, 2005, 117(1): 95-121.
- [5] OWEN W M, MASTRODEMOS Jr N, RUSH B P, et al. . Optical navigation for deep impact[C]. *The Proceeding of the AAS /AIAA Space Flight Mechanics Meeting*, 2006.
- [6] 刘宇飞. 深空自主导航方法研究及在接近小天体中的应用[D]. 哈尔滨工业大学, 2007. LIU Y F. *Study on The Deep Space Autonomous Navigation Method and Its Application in Approaching The Small Celestial Bodies* [D]. Harbin Industry University, 2007. (in Chinese)
- [7] 常晓华. 深空自主导航方法研究及在小天体探测中的应用[D]. 哈尔滨工业大学, 2010. CHANG X H. *Research on Deep Space Autonomous Navigation Scheme and Application to Small Celestial Bodies Exploration* [D]. Harbin: Harbin Industry University, 2010. (in Chinese)
- [8] 朱圣英. 小天体探测器光学导航与自主控制方法研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2009. ZHU SH Y. *Optical Navigation and Autonomous Control Methods Research for Small Bodyprobe* [D]. Harbin: Harbin Industry University, 2009. (in Chinese)
- [9] 龚德铸, 王立, 卢欣. 微光探测 EMCCD 在高灵敏度星敏器中的应用初探[J]. *红外与激光工程*, 2007, 9(S): 534-538. GONG D ZH, WANG L, LU X. Detection of faint light EMCCD based on star sensor[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 9(S): 534-538. (in Chinese)
- [10] 袁家虎, 张建荣, 贺善金. 导航星敏器探测灵敏度研究[J]. *光电工程*, 1999, 12(6): 1-6. YUAN J H, ZHANG J R, HE SH J. A study on detection sensitivity of navigation star sensor[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1999, 12(6): 1-6. (in Chinese)
- [11] 黄富祥, 郭俊柏, 冯小虎. 闪电成像仪虚警率和探测率模拟计算[J]. *光子学报*, 2009, 12(12): 3116-3120. HUANG F X, GUO J B, FENG X H. Simulating calculation of lightning detection efficiency and false alarm rate for lightning imagery on Geo-satellite[J]. *ACTA Photonica Sinica*, 2009, 12(12): 3116-3120. (in Chinese)
- [12] 万磊, 贾平, 张叶, 修吉宏. 飞行器姿态对 CMOS 航空相机成像的影响[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(1): 203-209. WAN L, JIA P, ZHANG Y, XIU J H. Effect of aircraft attitude on imaging of CMOS aerial cameras[J]. *Editorial Office of Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(1): 203-209. (in Chinese)
- [13] 董涛, 倪晋平, 曾祥伟, 等. 单线阵 CCD 立靶双目目标同时着靶的信号处理[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(10s): 266-273. DONG T, NI J P, ZENG X W, et al. . Signal processing for double objectives to impact simultaneously on single linear CCD vertical target[J]. *Editorial Office of Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(10s): 266-273. (in Chinese)
- [14] 洪闻青, 姚立斌, 姬荣斌等. 基于不同积分时间帧累加的红外图像超帧方法[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(6): 1490-1500. HONG W Q, YAO L B, JI R B, et al. . A super-frame processing method for infrared image based on accumulation of different integration time frame [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(6): 1490-1500. (in Chinese)

#### 作者简介:



何家维(1982—),男,黑龙江虎林人,博士,副研究员,2005年于哈尔滨工程大学获学士学位,2013年于中国科学院大学获博士学位,主要从事数字图像处理、CCD与CMOS成像技术等方面的研究。E-mail: hejiawei3650@163.com



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