

文章编号 1004-924X(2015)增-0529-05

制冷对电子倍增 CCD 相机成像质量的影响

武星星*, 刘金国, 周怀得, 徐 东, 张博研

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 电子倍增 CCD 相机的读出噪声降低到 $1e^-$ 以下后, 暗电流噪声成为电子倍增 CCD 相机的主要噪声源。由于制冷可以显著降低电子倍增 CCD 的暗电流噪声, 因而其成为影响电子倍增 CCD 相机成像质量的重要因素。本文在分析比较不同制冷系统优缺点的基础上, 提出了适用于航天应用的电子倍增 CCD 相机制冷系统。通过构建电子倍增 CCD 相机的噪声模型, 分析了不同制冷效果对电子倍增 CCD 相机成像质量的影响。分析结果表明, 电子倍增 CCD 相机焦面的温度从 $30\text{ }^\circ\text{C}$ 降低到 $-30\text{ }^\circ\text{C}$, 信噪比从 82.90 提高到 87.16 后, 可以显著改善电子倍增 CCD 相机的成像质量。该项研究结果为航天用电子倍增 CCD 相机的研制提供了重要的设计依据。

关键词: 制冷; 空间相机; 电子倍增 CCD; 成像质量

中图分类号: V447.3 文献标识码: A doi: 10.3788/OPE.20152313.0529

Influence of cooling on imaging quality of EMCCD camera

WU Xing-xing*, LIU Jin-guo, ZHOU Huai-de, XU Dong, ZHANG Bo-yan

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: starglare@126.com

Abstract: After the readout noise of an Electron Multiplying Charge Coupled Device (EMCCD) camera is reduced as low as $1e^-$, the dark current noise becomes a primary noise source of the EMCCD camera. As the cooling can reduce the dark current noise of EMCCD camera remarkably, it has been one of the important factors influencing imaging quality of EMCCD camera. This paper analyzes and compares advantages and disadvantages of different cooling systems in the EMCCD camera, then it proposes a new cooling system for the EMCCD camera which is fitful for space-borne applications. By establishing a noise model of EMCCD camera, the influences of different cooling effects on imaging quality of EMCCD camera were analyzed. Analysis results indicate that Signal to Noise Ratio (SNR) of EMCCD camera is improved from 82.9 to 87.2 as the temperature of focal plane is lowered from $30\text{ }^\circ\text{C}$ to $-40\text{ }^\circ\text{C}$. In addition, imaging quality of EMCCD camera can be improved effectively. The research results provides design references for development of EMCCD cameras used in space sciences. shen.

Key words: cooling; space camera; Electron Multiplying CCD (EMCCD); imaging quality

收稿日期: 2015-06-05; 修订日期: 2015-06-25.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61108066), 吉林省科技发展计划资助项目 (No. 20130101028jc)

1 引言

电子倍增 CCD(EMCCD) 是新一代微光成像器件,其最大的特点在于读出寄存器之后自带了电荷载流子倍增寄存器,在信号电荷进入读出放大器之前,利用碰撞电离实现光生电荷几乎无噪声的倍增,从而实现了极微弱光信号的实时快速动态探测^[1]。与像增强电荷耦合器件(ICCD)和电子轰击耦合器件(EBCCD)相比,EMCCD 相机具有量子效率高、噪声低、动态范围好、体积小、寿命长等优点,可达到真正单光子事件的检测^[2-3],在民用和军事领域都有着不可替代的应用价值。

在天文观测领域,EMCCD 相机可用于探测微弱星光,并作为高精度星敏感器的核心部件用于导弹、飞机和航天器的导航设备中^[4]。在交通领域,EMCCD 相机可用于微弱光照条件下的交通监控,也可以装在汽车上构成夜间驾驶辅助系统,从而减少由于路面光线昏暗使驾驶员判断失误而导致的交通事故。在医学领域,EMCCD 相机可用于生物光探测和高速 CT。EMCCD 相机在军事上可用于微光夜视仪,装备在海、陆、空三军的夜间驾驶、火控和侦察设备中。在公共安全领域可以为公安和安保部门提供不依赖外界灯光、效果更好的夜间监控设备。

随着倍增增益的提高,EMCCD 相机的读出噪声可以降低到 $1e^-$ 以下,此时暗电流噪声成为 EMCCD 相机的主要噪声源。制冷可以显著降低 EMCCD 的暗电流噪声^[5],因而成为影响 EMCCD 相机成像质量的重要因素。本文在分析比较不同制冷系统优缺点的基础上,提出适用于航天应用的 EMCCD 相机制冷系统。并通过构建 EMCCD 相机的噪声模型,分析不同制冷效果对 EMCCD 相机成像质量的影响。

2 制冷系统的分析比较与设计

可应用于相机的制冷技术包括机械式制冷、辐射制冷、液氮制冷、半导体制冷、风冷和水冷等^[6-7]。在商业相机中,通常采用半导体制冷结合风冷和水冷的方式,如 Princeton Instruments 公司的 PI-MAX2 相机和 Andor 公司的 DH5H5 相

机。半导体制冷主要利用帕尔贴效应和汤姆逊效应,其优点是无活动部件、结构简单、无噪声、重量轻等,缺点是温度控制困难、制冷效果有限,通常需要借助风冷和水冷才能达到比较理想的制冷效果。而风冷和水冷在空间环境下无法实现,因此不适用于航天应用。

液氮制冷是通过液氮的汽化吸热得到低温,主要用在天文观测仪器上,如天文台用的 CCD 相机多数采用液氮制冷。其优点是温度控制精度高、容易实现极低的温度,液氮环保无毒。缺点是液氮在使用中不断消耗,需要定期加注,因此不适用于航天应用。

辐射制冷是最早应用于航天领域的制冷技术,其一方面通过尽可能地屏蔽外热流,另一方面通过辐冷板将热量辐射到宇宙冷黑空间。辐射制冷技术已应用于美国的导弹预警卫星和 Landsat 地球资源卫星上,我国的风云系列卫星和资源一号卫星上也使用了辐射制冷器。其优点是无活动部件、无噪声、可靠性高。缺点是质量重大、体积大、对卫星姿态和轨道控制要求高、制冷能力有限等。如 Landsat 卫星上使用的抛物面 G 型辐射器在 90.0 K 的制冷量为 26 mW。

机械式制冷技术主要包括斯特林制冷机和脉冲管制冷机。斯特林制冷机主要基于逆向斯特林循环,通过等温压缩、等容降温、等温膨胀制冷和等容升温等步骤实现制冷。由牛津大学提出的牛津型分置式斯特林机由压缩机、膨胀机和分置管组成,其采用板簧支撑技术使活塞和回热器运动组件进行非接触运动,从而显著提高制冷机的寿命和可靠性。斯特林制冷机的优点是受空间环境影响小、制冷量大、工作温度范围宽、体积小、重量轻等。缺点是结构复杂、振动和噪声大、存在电磁干扰等问题。需要解决的关键技术包括板簧支撑、间隙密封、杜瓦集成、减振和直线电机等。牛津型分置式斯特林机在 UARS 和 ERS21 等卫星上得到成功应用。代表性的斯特林制冷机有 Thales 公司的 UP 系列和 LSF 系列,以及 RICOR 公司的 K532 等。

脉冲管制冷机由脉冲管、压缩机和回热器等组成,其通过脉冲管内气体的压缩和膨胀代替斯特林机中的机械式低温排出器。由于冷端没有运动部件,结构和电控系统比斯特林制冷机简单,电磁干扰小,振动小,同时由于避免了密封材料的磨

损,从而可以实现更高的可靠性和更长的寿命^[8],脉冲管制冷机比斯特林制冷机在航天应用上更具优势。目前脉冲管制冷机的制冷水平已和斯特林制冷机相当,代表性的脉冲管制冷机为 TRW 公司的产品,其在 60 K 的制冷量可以达到为 2 W。

从以上的分析比较可以看出,脉冲管制冷机具有制冷能力强、结构简单、电磁干扰小、振动小、可靠性高和寿命长等优点,最适合于航天应用,因此本文中 EMCCD 系统采用脉管式制冷机进行制冷。图 1 为制冷系统的工作原理,制冷系统的核心控制单元为数字信号处理器(Digital Signal Processor DSP),DSP 产生的控制驱动信号经过功率驱动器后送至压缩机,压缩机进行制冷后通过冷端将低温传递至杜瓦。温度采集电路采集到模拟的温度信息后将其送至 A/D 转换器,将模拟的温度信息转换为数字量。DSP 定时采集数字量温度信息,采用 PID(Proportion-Integral-Derivation)算法控制制冷机工作,使焦面工作在理想的温度环境下。

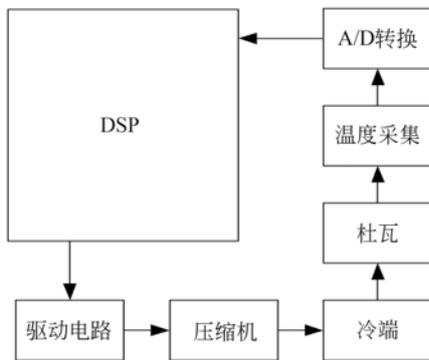


图 1 制冷系统工作原理

Fig. 1 Working principle of cooling system

3 制冷效果对成像质量的影响

在本文中 EMCCD 相机使用的探测器为 E2V 公司的 CCD201-20。如图 2 所示,其像元尺寸为 $13 \mu\text{m} \times 13 \mu\text{m}$,峰值量子效率高达 90% 以上,倍增增益为 1~1000,可调。

EMCCD 相机的噪声源包括读出噪声、暗电流噪声、附加噪声和时钟诱导噪声等。读出噪声随着倍增增益的提高而降低,可以降低到 $1e^-$ 以下。相对于读出噪声和暗电流噪声很小,时钟诱

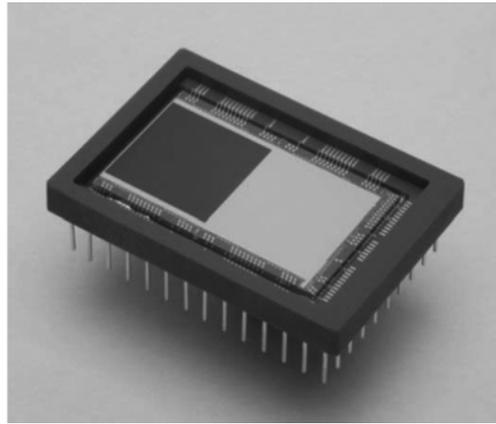


图 2 电子倍增 CCD CCD201-20 实物图

Fig. 2 Physical map of EMCCD CCD201-20

导噪声可以忽略不计,故暗电流噪声则成为 EMCCD 相机的主要噪声源。EMCCD 相机的信噪比可由公式(1)计算得到:

$$\text{SNR} = \frac{S}{\sqrt{F^2 \cdot (S + \delta_{\text{dark}}^2 + \delta_{\text{cic}}^2) + \frac{\delta_{\text{readout}}^2}{M^2}}}, \quad (1)$$

公式中: S 为光电子数, F 为噪声因子, δ_{dark} 为暗电流噪声, δ_{cic} 为时钟诱导噪声, δ_{readout} 为读出噪声, M 为倍增增益。

对于 CCD201-20 来说,噪声因子 F 为 $\sqrt{2}$,时钟诱导噪声可以忽略不计,不同焦面温度下的暗电流如图 3 所示。

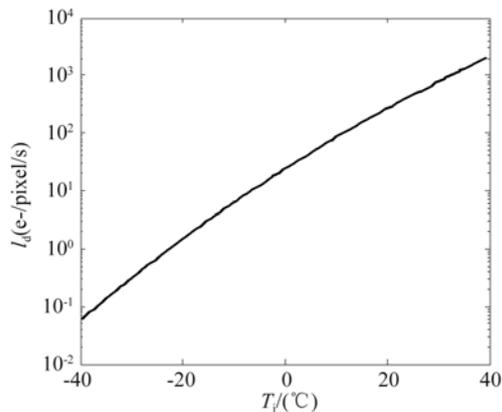


图 3 不同焦面温度下的暗电流

Fig. 3 Dark current when focal plane at different temperatures

由图 3 可以看出,在焦面的温度为 30°C 时,暗电流 I_d 为 $802e^-/\text{pixel/s}$,当焦面温度降低到 -30°C 时,暗电流 I_d 为 $0.31e^-/\text{pixel/s}$,相差了

2000 多倍,因此通过制冷可以有效降低 EMCCD 相机的暗电流噪声,进而有效降低系统的总噪声。

图 4 为 EMCCD 相机信噪比随温度的变化曲线。从图 4 中可以看出,随着焦面温度的上升,EMCCD 相机的信噪比逐渐下降,当焦面温度在 0°C 之前,信噪比的下降趋势较为平缓,而当焦面温度达到 0°C 之后,信噪比开始迅速下降。表 1 为不同焦面温度下的信噪比,从表 1 可以看出,当焦面温度为 -30°C 时,系统的信噪比为 87.16 倍,当焦面温度为 -10°C 时,系统的信噪比为 87.13 倍,相差约 0.03。而当焦面温度分别为 10°C 和 30°C 时,系统的信噪比分别为 82.90 倍和 87.13 倍,相差约 4.23。

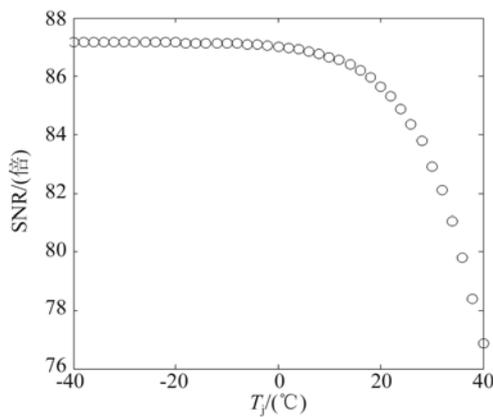


图 4 信噪比随焦面温度的变化曲线

Fig. 4 SNR curve varies with focal plane temperatures

由图 4 和表 1 可以看出,当 EMCCD 相机焦面的温度从 30°C 降低到 -30°C 时,信噪比从 82.90 提高到 87.16,可以显著改善 EMCCD 相机的成像质量。而且当环境温度较高时,制冷会对

成像质量的提高产生更为明显的效果。

表 1 不同焦面温度下的信噪比

Tab. 1 SNR of focal plane at different temperatures

焦面温度 T_j ($^{\circ}\text{C}$)	信噪比 SNR/(倍)
-30	87.16
-10	87.13
-5	87.09
0	87.03
5	86.91
10	86.67
15	86.31
20	85.66
25	84.63
30	82.90
35	80.41
40	76.87

4 结 论

EMCCD 相机通过电子倍增效应可以有效降低读出噪声,随着倍增增益的提高,EMCCD 相机的读出噪声可以降低到 $1e$ 以下,此时暗电流噪声成为 EMCCD 相机的主要噪声源。通过制冷可以显著降低 EMCCD 的暗电流噪声,因此制冷成为提高 EMCCD 相机成像质量的重要手段。本文在分析比较不同制冷系统优缺点的基础上,提出了适用于航天应用的 EMCCD 相机制冷系统,并通过构建 EMCCD 相机的噪声模型,分析了不同制冷效果对 EMCCD 相机成像质量的影响。分析结果表明,当 EMCCD 相机的焦面温度从 30°C 降低到 -30°C ,信噪比从 82.90 提高到 87.16,可以显著改善 EMCCD 相机的成像质量。

参考文献:

- [1] 卜洪波,陈瑞明,张玉贵,等.一种星载相机 EMCCD 高压驱动电路设计[J]. 航天器工程,2012,21(3): 48-53.
 BU H B, CHEN R M, ZHANG Y G, et al.. Design of high-voltage driver circuit for EMCCD in satellite camera[J]. *Spacecraft Engineering*, 2012, 21(3): 48-53. (in Chinese)
- [2] 余达,刘金国,薛旭成,等.光耦在 EMCCD 电源中

的应用[J]. 电光与控制,2014,21(2):60-64.

YU D, LIU J G, XUE X CH, et al.. Application of optocoupler circuit in EMCCD power supply[J]. *Electronics Optics & Control*, 2014, 21(2): 60-64. (in Chinese)

- [3] 史继芳,杨斌,韩占锁,等.基于双重模型客观评价微光像增强器的分辨力[J]. 光学精密工程,2013, 21(9):2260-2265.

SHI J F, YANG B, HAN ZH S, et al.. Objective evaluation of resolution for low-light-level image in-

- tensifier based on dual-model [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(9):2260-2265. (in Chinese)
- [4] 卢纯青, 武延鹏, 梁潇, 等. 高动态 EMCCD 星敏感器总体参数设计方法[J]. *空间控制技术与应用*, 2013, 39(6):58-62.
LU CH Q, WU Y P, LIANG X, *et al.*. A system parameter design method for EMCCD star tracker in high dynamic applications[J]. *Aerospace Control and Application*, 2013, 39(6):58-62. (in Chinese)
- [5] 张闻文, 陈钱. 基于电子倍增 CCD 噪声特性的最佳工作模式[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(10):1977-1981.
ZHANG W W, CHEN Q. Optimum operation mode based on noise characteristics of electron multiplying CCD[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(10):1977-1981. (in Chinese)
- [6] 刘静, 刘惠, 袁礼华. 镜头分离式 CCD 液氮杜瓦传热设计[J]. *半导体光电*, 2010, 31(3):380-382.
LIU J, LIU H, YUAN L H. Theoretical calculations for liquid nitrogen dewar in separate CCD camera [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2010, 31(3):380-382. (in Chinese)
- [7] 陈永生. 微型斯特林制冷机的研究进展[J]. *红外*, 2002(8):11-19.
CHEN Y SH. The development of research on stirling cryocooler [J]. *Infrared*, 2002(8):11-19. (in Chinese)
- [8] 胡白楠, 陈晓屏, 夏明. 微型斯特林制冷机的进展[J]. *红外技术*, 2006, 12(8):730-734.
HU B N, CHEN X P, XIA M. The development of low-power stirling cryocooler [J]. *Infrared Technology*, 2006, 12(8):730-734. (in Chinese)

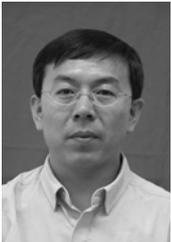
作者简介:



武星星 (1980—), 男, 河南洛阳人, 博士, 研究员, 2001 年、2004 年、2007 年于吉林大学分别获得学士、硕士和博士学位, 主要从事空间遥感成像技术、智能控制等方面的研究。E-mail: star-glare@126.com



徐东 (1972—), 男, 甘肃正宁人, 学士, 副研究员, 1992 年于吉林大学获得学士学位, 主要从事空间遥感成像技术的研究。Email: xudong720910@sina.com



刘金国 (1968—), 男, 吉林蛟河人, 硕士, 研究员, 主要从事空间遥感与图像处理方面的研究。E-mail: liujg@ciomp.ac.cn



张博研 (1987—), 女, 吉林白城人, 硕士, 研究实习员, 2013 年于西安电子科技大学获得硕士学位, 主要从事空间遥感成像技术的研究。Email: boyan1021@hotmail.com



周怀得 (1975—), 男, 四川射洪人, 工学博士, 研究员, 主要研究方向为传感器成像和数字图像处理。E-mail: gjszhd@sohu.com