

利用抗光晕通道倾泻电荷的帧转移 EMCCD 电子快门方法

张猛蛟^{1,2}, 蔡毅^{1,3}, 叶梁¹, 陈远金^{1,2}, 徐春叶², 王岭雪¹

(1. 北京理工大学光电学院 纳米光子学与超精密光电系统北京市重点实验室, 北京 100081;
2. 华东光电集成器件研究所, 江苏 苏州 215163; 3. 中国兵器科学研究院, 北京 100089)

摘要: 针对帧转移结构电子倍增电荷耦合器件(EMCCD)对高速运动目标成像模糊、高亮度目标成像饱和且细节缺失的问题, 提出了利用抗光晕通道倾泻多余电荷和外部时序控制的电子快门方法, 通过帧转移时序将感光区电荷转移到与存储区相邻的抗光晕沟道进行倾泻, 实现标准视频连续输出中 1/25~1/1 000 s 连续可调的电子快门, 并推导了抗光晕漏极最大倾泻电流与光照强度之间的数学关系式; 使用 FPGA 硬件图像处理消除了曝光时间缩短引起的漏光-拖尾(smear)效应; 采用带有抗光晕结构的帧转移 EMCCD 开发了原理相机进行实验验证。结果表明, 通过该方法控制电子快门可以有效降低旋转运动目标的成像模糊, 并实现夜间的高动态范围夜视成像, 显著提升图像细节。

关键词: EMCCD; 电子快门; 抗光晕通道; 漏光-拖尾效应; 高动态范围图像

中图分类号: TN386.5 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0620001

Electronic shutter for frame-transfer EMCCD using anti-blooming channel to bleed off charges

Zhang Mengjiao^{1,2}, Cai Yi^{1,3}, Ye Liang¹, Chen Yuanjin², Xu Chunye², Wang Lingxue¹

(1. Beijing Key Laboratory of Nanophotonics and Ultrafine Optoelectronic Systems,
School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
2. East China Institute of Optoelectronic Integrated Device, Suzhou 215163, China;
3. Ordnance Science and Research Academy of China, Beijing 100089, China)

Abstract: To resolve the issues of the image blurring of high-speed moving objects and the imaging saturation of high brightness objects and missing detail, an electronic shutter method for frame-transfer EMCCD using anti-blooming channel to bleed off charges and external time frequency control was proposed. Through bleeding off the charges in light sensitive area into the anti-blooming channel which adjacent to the storage area, an adjustable electronic shutter among 1/25 s and 1/1 000 s was realized. And at the same time, the standard video signal was output continuously. The relationship between the illumination intensity and the maximum bleeding-off current of the anti-blooming drain was formulated. The smear effect induced by the short exposure time (shutter time) was corrected online through writing the correction algorithm into the FGPA chip of the EMCCD readout circuit. A prototype system using

收稿日期: 2018-01-05; 修订日期: 2018-02-03

基金项目: 国家自然科学基金(61471044); 国家重点研发计划(2017YFC0110100)

作者简介: 张猛蛟(1980-), 男, 博士生, 主要从事 EMCCD 探测器和成像技术方面的研究。Email: zmj0806@163.com

通讯作者: 王岭雪(1973-), 女, 副教授, 博士, 主要从事红外成像、图像处理和红外光谱等方面的研究。Email: neobull@bit.edu.cn

frame-transfer EMCCD with anti-blooming channel was built up to conduct imaging experiments. The results verify that this electronic shutter can effectively decrease the image blurring of rotating objects and facilitate high dynamic range imaging in the nighttime.

Key words: EMCCD; electronic shutter; anti-blooming channel; smear effect; high dynamic range imaging

0 引言

电子倍增电荷耦合器件(EMCCD)是片上集成倍增移位寄存器的高灵敏成像探测器,广泛应用于天文探测、生物医学、微光夜视等领域^[1-6]。为使像元的填充因子达到最优,EMCCD 多采用帧转移结构,背照射器件的峰值量子效率超过 90%^[7]。然而,帧转移结构存在标准视频连续输出时难以控制曝光时间、且曝光时间过短时会产生漏光-拖尾(smear)效应等问题,这限制了 EMCCD 在高速运动目标探测、夜间高动态成像中的应用^[8]。为控制帧转移 CCD 的曝光时间,2015 年,刘慧等提出了控制驱动时序的电子快门,实现 1/500 s 的快速曝光,具体方法是在一帧图像曝光开始前清除感光区和存储区的电荷,曝光结束后进行感光区电荷读出。然而,这种先积分后读出方法不能实现连续视频读出,在两帧图像信号读出之间增加了一个曝光时间,最大帧频随曝光时间增加而降低^[9]。此外,随着曝光时间降低,无效曝光分量(帧转移时间)的占比同步增加,smear 效应更为明显,必须通过算法加以修正。1999 年,Ruyten 利用信号转移时间和积分时间之比确定了 smear 分量^[10]。目前,smear 消除方法主要包括以小波变换^[11]和帧转移时间计算背景进行扣除^[10]的图像处理方法,提高器件驱动频率的硬件方法^[12],以及考虑光源变化的数值解析算法,然而这些方法均在后续的计算机中实现,增加了系统后处理的复杂度^[13]。

为解决目前帧转移 EMCCD 改变曝光时间不能连续输出标准视频的问题,文中提出利用抗光晕沟道倾泻电荷和外部时序控制的电子快门方法,通过帧转移时序将感光区电荷转移到与存储区相邻的抗光晕沟道进行倾泻,使帧转移 EMCCD 在连续输出标准视频的同时也具有电子快门功能,且快门时间在 1/25~1/1 000 s 之间连续可调。文中首先对集成抗光晕通道的 EMCCD 器件结构进行分析,计算了抗

光晕通道在不同光照条件下所需的电荷倾泻能力,并给出电子快门的驱动时序原理;然后,对因曝光时间缩短而产生的 smear 效应进行定量分析,通过中值滤波方法提取出 smear 分量用于后续图像处理的扣除,该方法通过 EMCCD 读出电路中的 FPGA 芯片进行硬件化,实现 smear 效应的在线消除;最后,通过实验验证文中方法在降低旋转运动目标成像模糊、白天高照度抗饱和成像和夜间高动态范围夜视成像的有效性。

1 利用抗光晕通道倾泻电荷的帧转移 EMCCD 电子快门方法原理

1.1 抗光晕通道的电荷倾泻能力分析

带抗光晕结构的帧转移 EMCCD 含感光区、存储区、水平读出区、倍增区、输出放大器等部分,如图 1 所示。当帧转移信号 $I\Phi_1$ 、 $I\Phi_2$ 为低电平时,感光

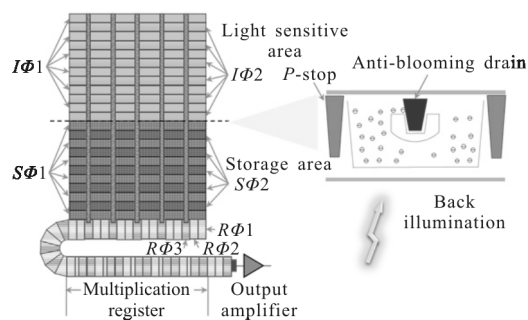


图 1 带有抗光晕结构的帧转移 EMCCD 示意图。图中 $I\Phi_1$ 、 $I\Phi_2$ 为加载到感光区的帧转移时钟, $S\Phi_1$ 、 $S\Phi_2$ 为加载到存储区的帧转移时钟

Fig.1 Diagram of frame-transfer EMCCD with anti-blooming drain.

$I\Phi_1$ and $I\Phi_2$ are frame-transfer clocks loaded in sensitive area, $S\Phi_1$ and $S\Phi_2$ are frame-transfer clocks loaded in storage area

区处于曝光状态进行电荷累积,曝光时间结束后,电荷在感光区和存储区时钟驱动下快速转移到存储区;存储区电荷逐行输出的同时,感光区进行下一帧

图像的曝光。抗光晕通道集成在像元旁边,当输入光很强导致像元中的累积电荷饱和时,多余电荷从抗光晕通道溢出,避免像元间的电荷扩散。

为在不改变输出帧频的同时引入电子快门,实现边读出边积分曝光方式,在存储区信号读出期间的时序不能改变,因此文中提出利用抗光晕通道倾泻电荷,在一帧图像曝光开始前,帧转移时钟驱动垂直转移栅 $I\Phi 1$ 、 $I\Phi 2$ 将感光区电荷转移到与存储区相临的暗像元中(通常 EMCCD 具有数行的暗像元),累

积的饱和电荷通过抗光晕漏极倾泻,然后开始曝光下一帧图像。该过程中,视频图像输出一直在持续,器件积分时间 T_{int} 为清零时刻 t_{clear} 和帧转移时刻 t_{ft} 之差:

$$T_{int} = t_{ft} - t_{clear} \quad (1)$$

图 2 是标准连续视频中电子快门实现的原理和驱动时序,通过连续改变感光区栅极驱动信号 $I\Phi 1$ 、 $I\Phi 2$ 的清零时刻,器件曝光时间实现了 $1/25 \sim 1/1000$ s 的连续可调,而视频输出周期 T_{frame} 保持不变。

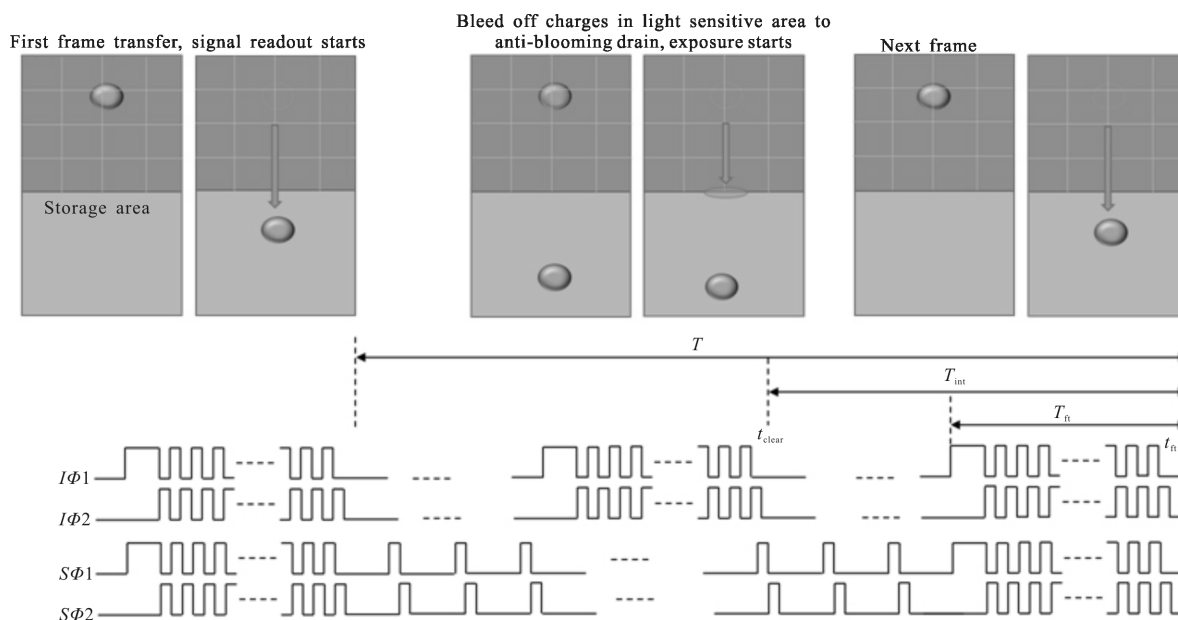


图 2 电子快门的实现原理和驱动时序

Fig.2 Working principle of the electronic shutter and the corresponding driving clocks

抗光晕漏极的电荷倾泻能力是电子快门实现的关键。最大倾泻电流 I 由两部分组成,一是整帧读出时间 T 内像元饱和溢出的电流 I_r , 二是清零时刻瞬态倾泻电流 I_{ft} , 其关系为:

$$I = I_r + I_{ft} \quad (2)$$

当光照度很强时,曝光清零时刻前像元势阱处于饱和状态时,抗光晕漏极的最大倾泻电流可通过公式(3)、(4)计算:

$$I_r = \int_{350}^{1000} \frac{P(\lambda)}{h \cdot c / \lambda} \cdot S_{ia} \cdot \eta_{EQE}(\lambda) \cdot d(\lambda) \quad (3)$$

$$I_{ft} = \frac{N_h \cdot N_v \cdot N_f \cdot e}{T_{ft}} \quad (4)$$

式中: λ 为波长; P 为光谱辐照度; h 为普朗克常量; c 为光速; S_{ia} 为单位感光区面积; $\eta_{EQE}(\lambda)$ 为 EMCCD 量子效率; N_h 为水平像素数; N_v 为垂直像元数; N_f 为满

阱电荷数; e 为电子电量。

在较弱光照下,像元势阱可能未被电荷填满,抗光晕漏极最大倾泻电流只有 I_{ft} 项,电荷只在清零时间 T_{ft} 内倾泻。此时有:

$$I_r = 0 \quad (5)$$

$$I_{ft} = \frac{T - T_{int}}{T_{ft}} \cdot \int_{350}^{1000} \frac{P(\lambda)}{h \cdot c / \lambda} \cdot S_{ia} \cdot \eta_{EQE}(\lambda) \cdot d(\lambda) \quad (6)$$

以标准太阳辐射光谱 AM1 为参照,分析 $0.00001 \sim 1$ 个太阳光照强度和光学镜头不同光圈条件下的抗光晕漏极倾泻电流,如图 3 所示。图 3(a)给出了太阳辐射光谱和背照射结构 EMCCD 量子效率曲线,图 3(b)是中的虚线是不同理想光圈下,抗光晕漏极电流随太阳辐照强度的变化关系。随着光通量减小,抗光晕漏极通过的最大倾泻电流强度接近 I_{ft} ,当光通量降低到不足以使探测器产生满阱电荷时,

最大倾泻电流由公式(5)和(6)计算,呈现完全与光通量线性变化的关系。图 3(b)中黑色实线,是理论上探测器 1/1 000 s 电子快门非饱和成像时对应抗光晕漏极电流的极限,超过黑色实线的抗光晕倾泻电流,将使探测器成像处于饱和状态。

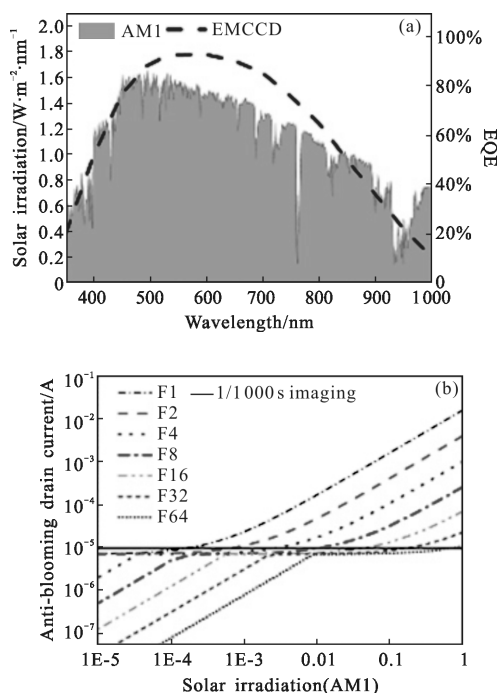


图 3 (a) AM1 太阳光谱辐照度和 EMCCD 量子效率曲线;(b) 不同强度的太阳辐照度和光圈的抗光晕漏极最大倾泻电流

Fig.3 (a) Spectral irradiation of AM1 sunlight and the EQE of EMCCD; (b) Maximum current of anti-blooming drain under different solar irradiation and apertures

1.2 Smear 效应及去除方法

帧转移器件 smear 效应是因为将感光区电荷转移到存储区时需要一定的时间,使每一个像元多接收所在列其他像元对应光源的照射,而出现明暗条纹背景。这种效应是帧转移器件实现高填充比和高灵敏度探测所带来的固有缺陷。为了去除 smear 效应,可以采用延长曝光时间,减小转移周期进行缓解^[12],但对硬件电路要求极高,且不能完全消除。因此通过软件算法消除 smear 效应,成为高灵敏帧转移器件应用中的研究热点^[10,11,13]。

文中主要是针对电子快门时间缩短引起的 smear 效应进行处理,所以假定照明光源恒定,不考虑变光源情况。像元接收光信号强度可以由公式(3)给出:

$$S_{int} = S_{pixel} + S_{ft} + S_{dark} \quad (3)$$

式中: S_{int} 是积分期间像元所累积的电荷; S_{pixel} 为探测接收的有效曝光信号; S_{ft} 为帧转移器件的额外曝光信号; S_{dark} 是像元累积的暗电流信号。

EMCCD 低于 20 °C 工作时, S_{dark} 小于 $3e^{-7}/\text{pixel} \cdot \text{frame}^{-1}$,短时间曝光可被忽略。 S_{ft} 是总信号的 smear 分量,且随着曝光时间的缩短, S_{ft} 相对于总信号的占比增大,smear 效应增强。当电子快门达到 1/1 000 s 时,帧转移时间 0.4 ms 接近整个积分周期的二分之一,因此,在高速电子快门中必须对 smear 效应进行处理。

为了去除 smear 效应,引入中值滤波算法,如公式(4)所示。首先对列信号进行累加,相对于电子快门处于静态的光源,在计算出每列信号的平均值后,按帧转移时间与积分时间进行的比值对其进行加权处理,得到滤波平均后的 S_{ft} ,最后对原始图像中的信号进行差值运算扣除 smear 分量。

$$S_{ft} = \frac{T_{ft}}{T_{int}} \cdot \frac{1}{n} \cdot \sum_{k=1}^n S_{int}(k) \quad (4)$$

式中: $S_{int}(k)$ 是每列第 k 行的像元信号。表 1 给出了不同曝光时间 smear 分量与总信号的占比。

表 1 smear 在不同曝光时间下的占比

Tab.1 Smear components in different exposure times

Exposure time/s	Smear integration time/ms	Proportion in the total signal
1/25	0.4	1%
1/50	0.4	2%
1/100	0.4	4%
1/200	0.4	8%
1/400	0.4	16%
1/800	0.4	32%
1/1 000	0.4	40%

2 实验结果与分析

选用 E2V 公司带抗光晕结构的帧转移 EMCCD (CCD216) 验证前面提出的电子快门方法,EMCCD 分辨率为 768×288,像元尺寸为 11.5 μm×23 μm,峰值量子效率超过 90%,符合 PAL 制式方形像素输出标准(768×576),曝光时间固定为 40 ms。基于该器件

制作了原理相机,含 CCD216 器件、驱动电路、电源、AD 采样电路、smear 处理和视频输出等部分,并通过 RS232 串口在上位机软件上控制曝光时间,样机和原理如图 4 所示。基于 smear 去除原理,在 FPGA 中对算法进行了硬件实现:首先将 AD 采样输入的视频图像缓存一帧到外部 RAM 中,同时计算出 S_n 存入 FPGA 内部 RAM,然后在输出图像时对每一个像素上累加的 smear 分量进行扣除,最后图像编码输出到接口芯片。

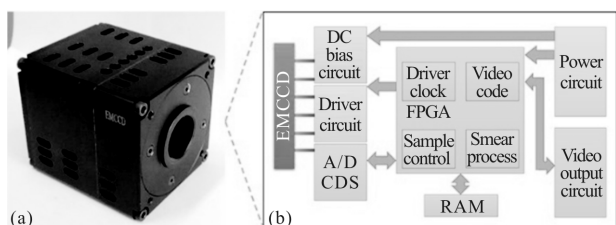


图 4 EMCCD 样机实物(a)和相机内部原理框图(b)

Fig.4 Picture of EMCCD prototype camera (a), and the schematic diagram of the EMCCD prototype camera (b)

2.1 Smear 效应去除

图 5 给出了 smear 去除模式和非去除模式的 EMCCD 成像,成像的电子快门为 1/1 000 s, smear 效应成份占比 40%,图 5(a)是没有开启 smear 去除模式的成像效果,图像有明显的拖尾条纹现象,整幅图像的对比度低。图 5(b)是去除 smear 效应后的成像效果。通过开启 smear 去除功能,图像质量得到显著改善。

选取图 5(a)和 5(b)中的 40 列像元对水平方向累加投影, smear 效应去除前后的对比度如图 5(c)所

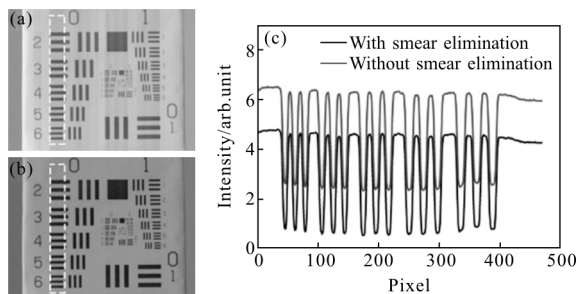


图 5 Smear 去除效果, (a)、(b)分别对应 smear 去除模式和非去除模式的成像, (c)为(a)和(b)矩形框区域对水平轴的投影

Fig.5 Elimination of smear effect, (a), (b) are the photographs of resolution chart with and without smear elimination respectively, (c) is the horizontal projection of two subimages in the rectangle frame of (a) and (b)

示。smear 去除后图像中明暗条纹的对比度从 2.7:1 提升到了 7.5:1,图像清晰度得到显著提升。对比度改善是因为 smear 效应对应的直流分量被有效去除。由于 smear 效应是由固定的帧转移时间引入,不同曝光时间下,在总信号中的占比如表 1 所示,随着曝光时间的缩短,去除 smear 效应对图像的质量的提升愈加明显。

2.2 旋转目标成像

成像目标采用 USAF1951 靶板图像,安装在交流伺服电机转轴前端,测试光学镜头焦距 75 mm,相机距离目标约 4.5 m,室内环境照度 249 lx。设置目标转速为 2 r/s,不同电子快门下的目标成像如图 6 所示。随着曝光时间减小,图像旋转模糊降低,在 1/800 s 时,人眼已看不出图像的旋转模糊。

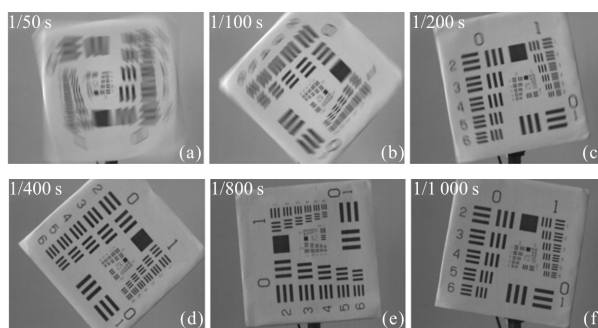


图 6 不同电子快门下的旋转目标成像

Fig.6 Photographs of the rotating target at different electronic shutters

旋转目标成像中相机获取图像与目标图像的关系可由公式(5)表示:

$$p(x, y) = \int_0^T f(x - r \cdot \cos(\omega t), (y - r \cdot \sin(\omega t))) \cdot dt \quad (5)$$

式中: (x, y) 为获取图像以旋转中心为零点、坐标为 (x, y) 的图像灰度; $f(x, y)$ 是对应目标图像的亮度; T 为图像的积分时间; r 为距离旋转中心的距离; ω 为目标图像的旋转角速度。

随着积分时间变化,目标图像位移增大,图像产生了旋转模糊。表 2 给出了 1/1 000 s 曝光时间内, 2 r/s 的目标在传感器不同径向位置处所扫掠的距离。当旋转中心与探测器中心重合时,目标图像在最大径向位置处的扫掠距离小于 3 个像元,大部分区域小于 2 个像元。理论计算和实验结果表明,电子快门的引入有效抑制了运动目标的成像模糊。

表 2 当 1/1 000 s 曝光时间时 2 r/s 旋转目标在传感器不同径向位置处所扫掠的距离

Tab.2 Distance swept by the 2 r/s rotating target at different radial positions of the sensor in 1/1 000 s

Distance to center of rotation/ μm	Target moving distance on the sensor/ μm	Moving pixels on the sensor
1 000	6.3	0.5
2 000	12.6	1.1
3 000	18.8	1.6
4 000	25.1	2.2
5 520	31.4	2.7

2.3 白天高照度条件下抗饱和成像

EMCCD 具有高灵敏度,可作为全固态微光夜视器件,但白天使用时,标准积分时间下很容易达到饱和,配备普通光学系统难以实现全天时工作要求。增加电子快门功能后,EMCCD 成像饱和得到了显著的抑制。图 7 给出了原理相机在中午不同曝光时间的成像,测试时天顶照度为 $1.1 \times 10^5 \text{ lx}$ 。结果表明,标准曝光时间的图像完全饱和,随着快门时间缩短,图像饱和程度减弱,1/1 000 s 电子快门下 EMCCD 相机可输出清晰图像(镜头焦距 25 mm、光圈 F16)。

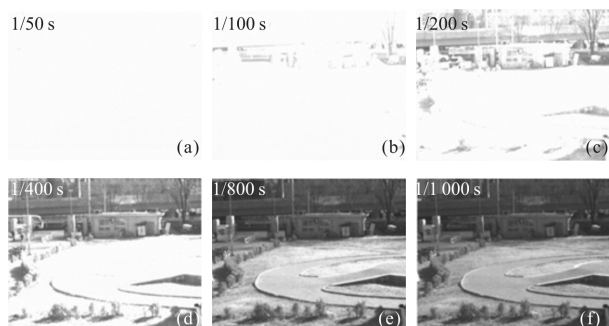


图 7 不同电子快门时 EMCCD 相机的白天抗饱和和测试结果
Fig.7 Test results of the daytime saturation resistance of the EMCCD camera with different exposure times

理论上,在 AM1 太阳辐射强度下成像,需要光学系统具有 F64 光圈再配合 1/1 000 s 快门。实际上,由于地面环境成像非太阳直接辐射,而是反射成像,探测器的靶面照度远低于理论计算数值,所以当镜头光圈为 F16 和 1/1 000 s 电子快门时,EMCCD 可抗饱和成像。

2.4 夜间高动态范围成像

为测试夜间高动态范围成像,在室内 $2.3 \times 10^{-2} \text{ lx}$ 环境照度下,将笔记本电脑屏幕置于暗背景中生成高动态场景。EMCCD 相机以 1/25、1/50、1/400 s 的快门对场景进行曝光,成像结果分别对应图 8(a),8(b)和 8(c)。高动态图像的处理算法参见参考文献[14]。首先将每一幅图像划分成 10×10 的小块,选取不同曝光时间图像中信息量最大块组合成图 8(d)所示的最优块图像,然后通过图像融合算法平滑各个块之间的非连续亮度,得到高动态图像图 8(e),高动态图像的细节获得显著增强。虽然通过调节倍增增益也能得到不同亮度图像,但倍增使每幅图像的噪声大小不一致,且难以在连续两帧图像中快速切换。因此,通过电子快门实现 EMCCD 夜间高动态成像是一种简单有效的方式。

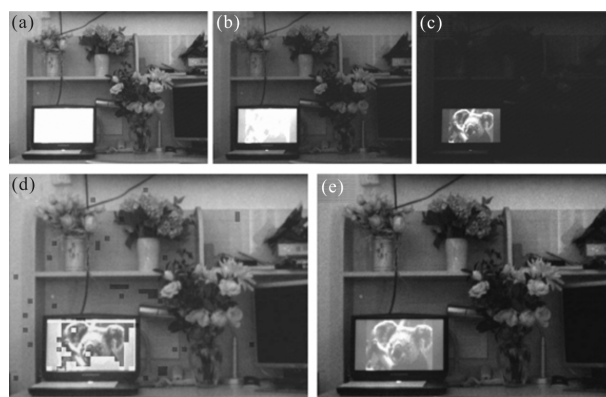


图 8 高动态夜视图像,(a)、(b)和(c)是分别在 1/25、1/50、1/400 s 电子快门下的夜视图成像,(d)选取最优块后的图像,(e)融合后的高动态夜视图像

Fig.8 High dynamic night vision image, (a), (b) and (c) are night vision images under the 1/25, 1/50 and 1/400 s exposure times respectively, (d) The most informative regions of the input images, (e) Output image processed by fusing

3 结论

文中提出了利用帧转移器件抗光晕通道实现连续视频读出时的电子快门功能,曝光时间可在 1/25~1/1 000 s 之间连续可调,并通过在线的 FPGA 图像处理算法计算了以列为单位的 smear 背景,消除了帧转移时间与曝光时间接近时所引入的 smear 效应,去除后图像中明暗条纹的对比度从 2.7:1 提升到了 7.5:1,图像清晰度得到显著提升。EMCCD 集成电子

快门后可以对 2 r/s 的旋转运动目标清晰成像,避免高速运动目标的成像模糊,白天高照度下配合 F16 的光学镜头能避免植被目标的成像饱和,夜间低照度下通过改变曝光时间实现了高动态夜视成像。EMCCD 中电子快门功能有效解决了运动目标成像模糊、高照度下成像完全依赖光学衰减、夜间高动态场景成像细节损失的问题,为固态微光器件在上述领域的应用提供了一种简单有效的途径。

参考文献:

- [1] Avella A, Ruo-Berchera I, Degiovanni I P, et al. Absolute calibration of an EMCCD camera by quantum correlation, linking photon counting to the analog regime [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(8): 1841–1844.
- [2] Bolduc E, Faccio D, Leach J. Acquisition of multiple photon pairs with an EMCCD camera [J]. *Journal of Optics*, 2017, 19(5): 054006.
- [3] Stevens E G, Clayhold J A, Doan H, et al. Recent enhancements to interline and electron multiplying CCD image sensors.[J]. *Sensors*, 2017, 17(12): 2841.
- [4] Djazovski O, Daigle O, Laurin D, et al. Electron-multiplying CCDs for future space instruments [C]//Proceedings on Photons North 2013 of SPIE, 2013, 8915: 89150Q.
- [5] Bai Yu, Chen Yuanjin, Zhang Mengjiao, et al. Method and demonstration of true-color imaging by EMCCD[J]. *Infrared Technology*, 2017, 39(4): 329–340. (in Chinese)
白玉, 陈远金, 张猛蛟, 等. EMCCD 真彩色成像方法与验证[J]. *红外技术*, 2017, 39(4): 329–340.
- [6] Qiu Xiaohan, Wang Yu, Chang Zhen, et al. Design and implementation of CCD imaging circuit for airborne ultraviolet DOAS imaging spectrometer[J]. *Infrared & Laser Engineering*, 2017, 46(5): 0538002. (in Chinese)
邱晓晗, 王煜, 常振, 等. 机载紫外 DOAS 成像光谱仪 CCD 成像电路的设计及实施 [J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(5): 0538002.
- [7] Coates C G, Denvira D J, Mchale N G, et al. Ultra-sensitivity, speed and resolution: Optimizing low-light microscopy with the back-illuminated electron multiplying CCD[C]//Proceedings of SPIE, 2003, 5139: 56–66.
- [8] Basden A. Analysis of EMCCD and sCMOS readout noise models for Shack-Hartmann wavefront sensor accuracy [J]. *Physics*, 2015, 24(7): 1994–2002.
- [9] Liu Hui, Liu Xuebin, Chen Xiaolai, et al. Design and implementation of CCD exposure time control based on driver timing[J]. *Infrared & Laser Engineering*, 2015, 44(S1): 199–204. (in Chinese)
刘慧, 刘学斌, 陈小来, 等. 基于驱动时序控制 CCD 曝光时间的设计与实现 [J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(S1): 199–204.
- [10] Ruyten W. Smear correction for frame transfer charge-coupled-device cameras [J]. *Optics Letters*, 1999, 24 (13): 878–80.
- [11] Yao Rui, Zhang Yanning, Sun Jinqiu, et al. Smear removal algorithm of CCD imaging sensors based on wavelet transform in star-sky image [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 40(3): 413–418. (in Chinese)
姚睿, 张艳宁, 孙瑾秋, 等. 星图中基于小波变换的 CCD 传感器 Smear 现象消除方法 [J]. *光子学报*, 2011, 40(3): 413–418.
- [12] Chen Jianwu, Cao Kaiqin, Sun Dexin, et al. Driving techniques for high-frame-rate frame transfer CCDs with low smear [J]. *Infrared & Laser Engineering*, 2016, 45 (1): 0123001. (in Chinese)
陈剑武, 曹开钦, 孙德新, 等. 高帧频低拖尾帧转移 CCD 驱动技术[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(1): 0123001.
- [13] Liu Lu, Luo Tongding, Li Binkang, et al. Smear correction of asynchronous binning high frame rate CCD camera [J]. *Optics & Precision Engineering*, 2017, 25(1): 217–223. (in Chinese)
刘璐, 罗通顶, 李斌康, 等. 异步 Binning 高帧频 CCD 相机的拖尾校正[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(1): 217–223.
- [14] Varkonyikoczy A R. Improved fuzzy logic supported HDR colored information enhancement [C]//Instrumentation and Measurement Technology Conference of the IEEE, 2009: 361–366.