

## 脉冲激光辐照 CMOS 相机的图像间断现象及机理

周旋风, 陈前荣, 王彦斌, 朱荣臻, 李 华, 任广森

(中国洛阳电子装备试验中心, 河南 洛阳 471003)

**摘要:** 为了研究脉冲激光辐照 CMOS 相机时拍摄图像产生间断现象的原因, 利用 1 064 nm 脉冲激光对卷帘快门式 CMOS 相机进行了辐照实验。在获得的图像中观测到了间断现象, 表现为垂直方向上的亮区和暗区, 计算表明各帧图像中暗区的行数为固定值。根据 CMOS 图像传感器积分方式和扫描机制, 分析了图像间断现象的形成机理为卷帘快门式 CMOS 存储的不同步性。理论计算结果与实验结果一致, 并理论分析了完全无暗区图像存在的原因。提出了基于多帧间断图像采用拼接手段获得完整连续图像的方法, 得到的图像与直接拍摄图像基本一致。

**关键词:** 脉冲激光; CMOS; 辐照效应; 图像传感器

**中图分类号:** TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0306002

## Image interrupt effect and mechanism of pulse laser irradiated CMOS camera

Zhou Xuanfeng, Chen Qianrong, Wang Yanbin, Zhu Rongzhen, Li Hua, Ren Guangsen

(Luoyang Electronic Equipment Test Center of China, Luoyang 471003, China)

**Abstract:** Irradiation experiments with a 1 064 nm pulse laser were conducted to investigate the image interrupt effect of pulse laser irradiating CMOS camera with rolling shutter. Image interrupt effects were observed in the experimental results with bright area and dark area in the vertical direction. Calculation results show that the number of dark area rows is a constant. According to the integrating mode and scanning mode of CMOS image sensor, the formation mechanism of image interrupt effect is the storage asynchronism of CMOS with rolling shutter. Theoretical calculation value fit well with the experimental result. The reason of the existing of image without dark area was also theoretically explained. Method based on stitching several interrupted images was proposed to obtain a full image without interruption, which was very similar to the experimental imaging results.

**Key words:** pulse laser; CMOS; irradiation effect; image sensor

收稿日期: 2018-10-10; 修订日期: 2018-11-20

基金项目: 国家自然科学基金(11504420)

作者简介: 周旋风(1988-), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事光电对抗技术方面的研究。Email: zhouxuanfeng2012@163.com

## 0 引言

互补金属氧化物半导体 (Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS) 图像传感器是一种采用传统芯片工艺方法将光敏阵列、放大器、A/D 转换器、存储器、数字信号处理器和计算机接口电路等都集成在同一硅衬底上的光电成像器件<sup>[1-3]</sup>。近年来, 由于 CMOS 工艺水平的提高, 它在工业、交通及医学等越来越多的领域得到了应用, 成为国家经济发展和国防建设中重要的硬件设备<sup>[4]</sup>。随着 CMOS 图像传感器和激光应用日益广泛, 激光对 CMOS 的辐照影响也引起了人们的高度关注, 特别是在光电对抗领域, 激光辐照 CMOS 相机成为一个重要研究方向。近年来, 研究人员在激光对 CMOS 的干扰效应<sup>[5-6]</sup>、损伤效应<sup>[7-8]</sup>以及宽谱激光辐照效应<sup>[9-10]</sup>等方面开展了研究, 并对 CCD、CMOS 开展了对比性研究<sup>[11-12]</sup>。这些工作主要以实验测量 CMOS 的干扰阈值为主, 但对激光辐照情况下的图像特征等研究较少。在实际应用中, 很多时候也需要关注拍摄图像特征, 以便于真实记录和反映所需要拍摄的信息。张震等对连续激光辐照 CMOS 相机的像素翻转效应进行了实验研究并进行了机理分析<sup>[13]</sup>。另外, 笔者发现当采用脉冲激光辐照 CMOS 相机时, 可能在拍摄图像中产生间断现象, 但目前对此现象的形成机理还没见报道。

文中开展了纳秒脉冲激光辐照卷帘快门式 CMOS 相机的实验研究, 发现了拍摄图像在垂直方向上存在亮区和暗区相隔的间断现象。从 CMOS 的工作原理出发对这一现象的形成机理进行了分析。

## 1 实验现象

### 1.1 实验设计

采用脉冲激光辐照 CMOS 相机的实验装置布局如图 1 所示。脉冲激光器的输出激光首先经过扩束系统进行准直扩束, 之后采用小孔光阑对激光尺寸进行控制, 采用一系列可调固定衰减片实现激光能量衰减。在此之后通过反射镜进行光路调整, 然后激光经过一个 50:50 的分束镜, 其中反射激光进入功率计进行功率监测, 透射激光辐照 CMOS 相机。实验数据通过相机自带的图像采集软件实时显示记

录, 可通过读取图像灰度值判断脉冲激光对 CMOS 相机的辐照效应。

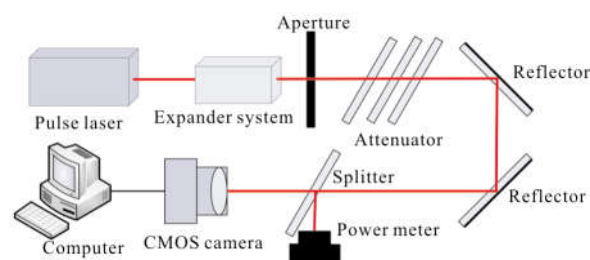


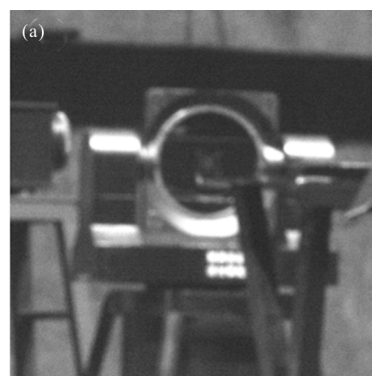
图 1 脉冲激光辐照 CMOS 相机实验布局示意图

Fig.1 Experimental setup for pulse laser irradiation on CMOS camera

该实验中所采用的 CMOS 相机型号为 DMK23GP031, 其成像芯片为 Aptina MT9P031, 分辨率为  $2592 \times 1944$ , 像素尺寸为  $2.2 \mu\text{m} \times 2.2 \mu\text{m}$ , 图像灰度量级为 12 bit, 默认扫描方式为逐行扫描。实验中采用的脉冲激光器的输出波长为  $1064 \text{ nm}$ , 脉冲宽度为  $10 \text{ ns}$ , 重复频率为  $5 \text{ Hz}$ , 单脉冲能量输出值为  $50 \text{ mJ}$ 。实验中设定相机的增益为  $15 \text{ dB}$ , 积分时间为  $143.3 \text{ ms}$ , 帧频为  $3.5 \text{ fps}$ 。

### 1.2 典型现象

实验中首先通过反射镜对激光光路进行调节, 确保脉冲激光能够辐照到 CMOS 相机。当调节好光路后, 保持反射镜位置固定, 在激光器不出光的情况下采用 CMOS 相机拍摄了背景图像, 如图 2(a)所示, 从图像中可以看到反射镜的影像。接下来让脉冲激光器出光, 采用的固定衰减片为  $25 \text{ dB}$ , 此时监测辐照到 CMOS 相机上的激光功率为  $0.4 \text{ mW}$ 。CMOS 相机采用的是卷帘快门模式, 共连续拍摄了 16 帧图像, 不同时刻的典型图像如图 2(b)~(d)所示。图像中只显示了反射镜周围  $1000 \times 1000$  像元的数据, 对应所在行为  $300 \sim 1300$ 。



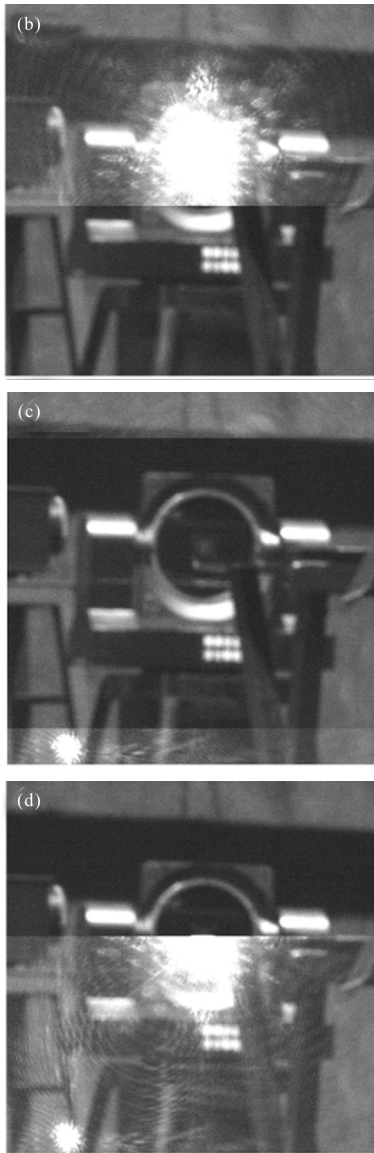


图 2 典型实验现象

Fig.2 Typical experimental phenomena

从图 2(b)~(d)的图像可以发现一个共同的现象,即三帧图像中在垂直方向上都存在图像间断现象,将间断的两侧分别称为亮区(Bright area)和暗区(Dark area)。例如图 2(b)中上半部分为亮区,下半部分为暗区,图 2(c)中的图像中间部分就都存在一条暗区,上下为亮区,这种图像称为暗区完整图像,图 2(d)中上半部分为暗区,下半部分为亮区。在拍摄的所有 16 帧图像中,存在图像间断现象的图像占 15 帧。这一现象在脉冲激光辐照 CMOS 相机的其他实验中也出现过,如图 3 所展示的就是参考文献[6]中所获得的拍摄图像,从中也可以清晰地看

出图像间断现象。

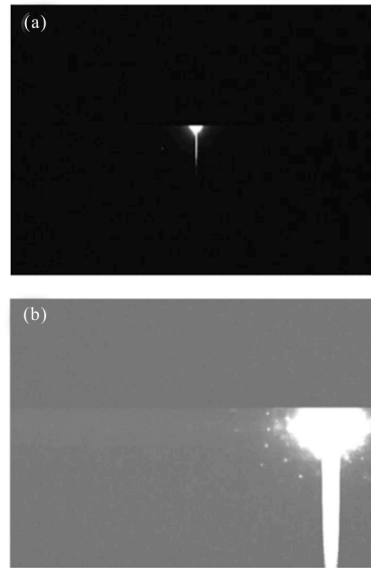
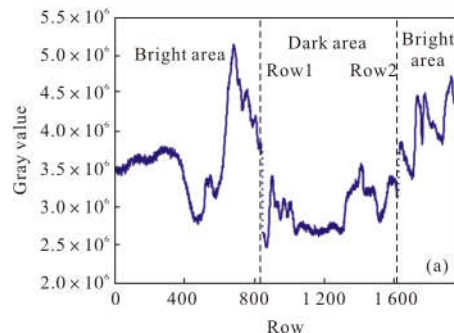


图 3 参考文献[6]中的典型实验现象

Fig.3 Typical experimental phenomena in Ref.[6]

为了进一步研究这一现象的特性,首先需要精确地寻找图像间断的具体位置。由于图像间断是在垂直方向上出现的,对应于 CMOS 传感器而言,就要确定间断所在行的信息。为此,用 MATLAB 读取图像灰度值,并对每一行的灰度值进行叠加,得到图 2(b)和图 2(c)对应的曲线分别如图 4(a)和图 4(b)所示,图中采用了所有行的数据信息。从图中可以看出,灰度值曲线在亮区和暗区的分界线上存在突变,此即为图像间断所在行的位置。图 4(a)中的图像间断所在行分别为 884 和 1 623,对应暗区所占行数为 779 行,而图 4(b)中的图像间断所在行分别为 423 和 1 202,对应暗区所占行数也为 779 行。采用类似方法对其他帧的图像进行分析计算,发现在所有暗区完整的图像中暗区所占的行数均为 779 行。



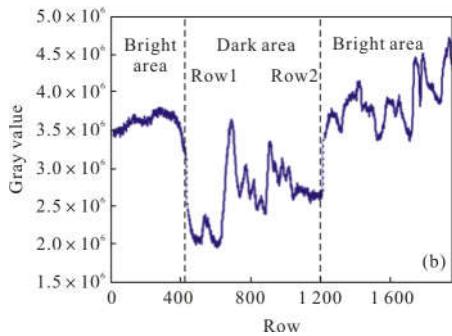


图 4 各行灰度值的分布曲线

Fig.4 Gray value distribution curve of each row

## 2 产生机理分析

为了揭示纳秒脉冲激光辐照 CMOS 相机时探测图像中断现象的产生机理,需要对 CMOS 的工作机理进行深入研究。同时由于相机采用的是逐行扫描方式,因此重点应该在图像时序上进行分析。

### 2.1 CMOS 工作原理

CMOS 图像传感器结构示意图如图 5 所示。CMOS 传感器具有片上集成系统,每个像元内都具备集成信号放大以及电路处理功能,各个像素之间相互绝缘,在电路结构中,同一列中每个像素的参考电压的提取都受同一列信号线控制。其工作过程为:当外界光照射到 CMOS 像素阵列上时,光电效应使得每个像素单元产生光生电荷;在行选逻辑的控制下,选通相应的行像素单元,在列选逻辑的控制下,选通行像素单元内的每个像元的信号,依次通过各自所在的列总线,将信号传输到相应的模拟信号处理单元;经过处理的模拟信号,通过 A/D 转换器,转换为数字信号输出。

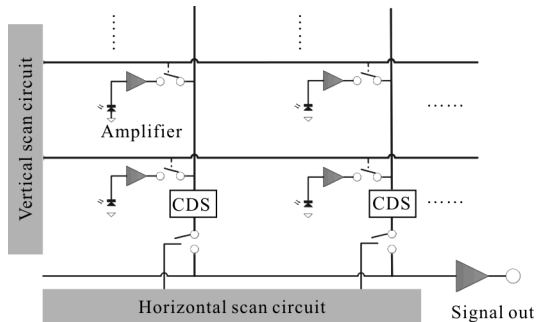


图 5 CMOS 图像传感器结构示意图

Fig.5 Architecture of a CMOS image sensor

可以看出,CMOS 图像传感器的像元阵列按照垂直方向和水平方向排列,每个像元都有它在行和

列方向上的地址。用于选址的行选逻辑和列选逻辑由时序脉冲电路产生,而这些工作脉冲受控于接口电路发出的同步控制信号。

### 2.2 效应机理分析

根据对景物采样方式的不同,CMOS 的图像获取模式可以分为卷帘快门模式和全局快门模式。当采用卷帘快门模式时,是对每一行依次曝光,即每行的成像时间是不同的,因此随着摄影面的扫描时序,储存时期会发生偏差,即存储的信息是不同时的<sup>[14]</sup>。这就意味着采用卷帘快门式 CMOS 在拍摄高速变化场景时会出现偏差,实验中由于采用的是脉冲激光,持续时间很短,因此存储不同时可能给拍摄图像带来影响。

图 6 为实验中 CMOS 采样时序示意图。图中上方坐标轴上的红短线代表激光脉冲时刻,中间扫描行的每一条线段代表该行对应的积分时间,而线段的末端对应为该行的读出时刻,下方坐标轴上红黑相间的区域对应着输出图像中的各行信息。实验中激光的脉冲周期为  $T_{las}=200\text{ ms}$ ,脉冲宽度为  $t_{las}=200\text{ ms}$  可以忽略不计,而 CMOS 的积分时间为  $T_{int}=143.3\text{ ms}$ ,扫描时间为  $T_{sca}=141.5\text{ ms}$ 。从图中可以看出,由于 CMOS 的积分时间小于激光的脉冲周期,因此只有积分时间包含了激光脉冲的像素点才会拍摄到激光信号,对应于图像中的亮区,而积分时间内不包含激光脉冲的像素点只会拍摄到背景信号,对应于图像中的暗区。而暗区所持续的时间应该为  $T_{dar}=T_{las}-T_{int}=56.7\text{ ms}$ ,对应的行数为  $R_{dar}=T_{dar}/T_{sca} \cdot 1944=779$ ,与实验中拍摄图像中暗区的行数正好吻合。另外,由于扫描时间小于积分时间,因而根据上述机理分析,可以判定存在某一个时刻的拍摄图像中可以完全没有暗区。在实验中获得 16 帧图像中,有一帧图像就不

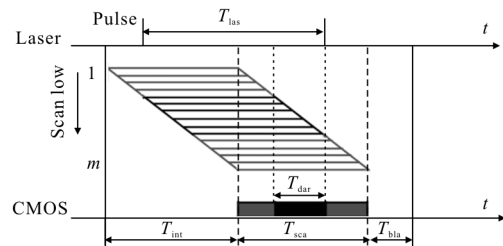


图 6 采样时序示意图

Fig.6 Schematic of sampling timing

存在图像间断现象,完全没有暗区,如图 7(a)所示,这也很好地验证了上述机理分析的合理性。

### 3 异常信号处理方法

根据上述分析,当采用脉冲激光对 CMOS 相机进行辐照实验时,如果采用的是卷帘快门模式,容易出现图像间断的现象,而为了分析辐照实验的结果,往往需要获得完整的连续图像,因此需要对间断图像进行处理。值得注意的是,一般情况下短时间内背景信息不会发生改变,只要用于辐照的脉冲激光也能保持相邻脉冲之间的稳定,可以通过将不同图像中的亮区进行拼接来获得完整的连续图像。图 7(b)给出的就是通过拼接的方法对图 2(b)~(d)三帧图像进行处理后得到的完整连续图像,可以看出与拍摄的图像图 7(a)基本一致。图 7(c)给出的是这两幅图像灰度值之差的图像显示,灰度残余主要是激光脉冲之间的差异导致的。图 7(d)给出的是图 7(b)和背景图像图 2(a)两幅图像灰度值之差的图像显示,从这幅图中可以大体看出脉冲激光在 CMOS 相机中的成像特性。

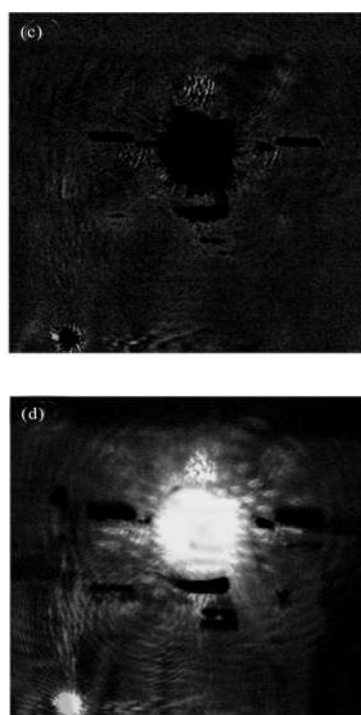
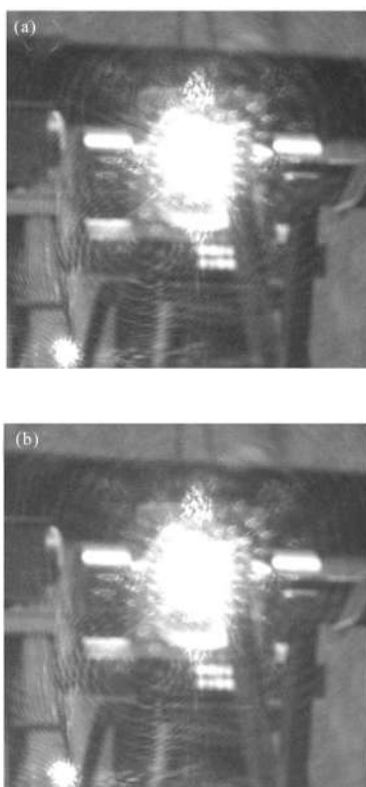


图 7 基于实验结果的拼接图像

Fig.7 Stitching images based on experimental results

### 4 结论

通过开展 1 064 nm 脉冲激光辐照 CMOS 相机的实验研究,获得了脉冲激光辐照下的输出图像,发现了图像间断现象并对实验结果进行了分析。根据 CMOS 图像传感器的工作原理,分析了图像间断现象的内在机理,认为是卷帘快门式 CMOS 在拍摄信号存储过程中的不同时性使得拍摄图像在行间存在间断现象,理论计算结果与实验结果吻合很好。针对图像间断现象,提出了多帧图像拼接方法获得完整连续图像的方法,拼接结果与拍摄结果基本一致,可以为脉冲激光辐照 CMOS 相机提供有效的一种图像处理思路。

#### 参考文献:

- [1] Kazuya Yonemoto. CCD/CMOS Image Sensor no Kiso to Ouyou [M]. Chen Rongting, Transl. Beijing: Science Press, 2006: 6-10. (in Chinese)  
Kazuya Yonemoto. CCD/CMOS 图像传感器基础与应用 [M]. 陈榕庭, 译. 北京: 科学出版社, 2006: 6-10.
- [2] Jiang Wenjie, Zeng Xuwen, Shi Jianhua. Photoelectric



- Technology [M]. Beijing: Science Press, 2009: 219–223. (in Chinese)
- 江文杰, 曾学文, 施建华. 光电技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2009: 219–223.
- [3] Wang Qingyou. Application Technology of Image Sensor[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2013: 157–170. (in Chinese)
- 王庆友. 图像传感器应用技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2013: 157–170.
- [4] Li Jijun, Du Yungang, Zhang Lihua, et al. Research progress on CMOS image sensors [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, 46(4): 45–52. (in Chinese)
- 李继军, 杜云刚, 张丽华, 等. CMOS 图像传感器的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2009, 46(4): 45–52.
- [5] Shao Ming, Zhang Leilei, Zhao Wei, et al. Experiment study on saturation effect of high-repetition-rate laser jamming CMOS camera[J]. *Laser Journal*, 2013, 34(2): 16–17. (in Chinese)
- 邵铭, 张雷雷, 赵威, 等. 高重复脉冲激光对 CMOS 相机饱和和干扰效果研究[J]. 激光杂志, 2013, 34(2): 16–17.
- [6] Wang Ang. Research on the irradiation effects of CMOS image sensor under laser [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2014: 11–43. (in Chinese)
- 王昂. 可见光 CMOS 图像传感器的激光辐照效应研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2014: 11–43.
- [7] Wang Ang, Guo Feng, Zhu Zhiwu, et al. Comparative study of hard CMOS damage irradiated by CW laser and single-pulse ns laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26(9): 43–47. (in Chinese)
- 王昂, 郭锋, 朱志武, 等. 连续激光与单脉冲纳秒激光对 CMOS 的损伤效应[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(9): 43–47.
- [8] Guo Feng, Zhu Rongzhen, Wang Ang, et al. Damage effect on CMOS detector irradiated by single-pulse laser [C]// International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging, Proc of SPIE, 2013, 8905: 890521.
- [9] Wang Jingnan, Nie Jinsong. Experimental study on supercontinuum laser irradiating a visible light CMOS imaging sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(1): 0106004. (in Chinese)
- 王景楠, 聂劲松. 超连续谱光源辐照可见光 CMOS 图像传感器的实验研究 [J]. 红外与激光工程, 2017, 46(1): 0106004.
- [10] Lai Liping, Fu Bo, Zhang Rongzhu. Effect of broadband sources on electrical crosstalk of CMOS array [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(1): 0120005. (in Chinese)
- 赖莉萍, 付博, 张蓉竹. 宽谱光源对 CMOS 阵列电串扰的影响[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(1): 0120005.
- [11] Guo Feng. Comparative study on the irradiation effect of the laser to CMOS and CCD [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013: 17–26. (in Chinese)
- 郭锋. 激光对 CMOS 和 CCD 的辐照效应对比研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013: 17–26.
- [12] Shao Ming, Zhang Le, Zhang Leilei, et al. Comparative study saturation effect of 1.06  $\mu\text{m}$  laser jamming CCD and CMOS cameras [J]. *Journal of Applied Optics*, 2014, 35(1): 163–167. (in Chinese)
- 邵铭, 张乐, 张雷雷, 等. 1.06  $\mu\text{m}$  激光对 CCD、CMOS 相机饱和和干扰效果对比研究 [J]. 应用光学, 2014, 35(1): 163–167.
- [13] Sheng Liang, Zhang Zhen, Zhang Jianmin, et al. Pixel upset effect and mechanism of CW laser irradiated CMOS camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(6): 0606004. (in Chinese)
- 盛良, 张震, 张检民, 等. 连续激光辐照 CMOS 相机的像素翻转效应及机理 [J]. 红外与激光工程, 2016, 45(6): 0606004.
- [14] Liu Hailong, Li Xiangzhi, Xue Xucheng, et al. Vibration parameter detection of space camera by taking advantage of CMOS self-correlation Imaging of plane array of roller shutter [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(6): 1474–1481. (in Chinese)
- 刘海龙, 李祥之, 薛旭成, 等. 利用卷帘快门面阵 CMOS 自相关成像的空间相机振动参数检测 [J]. 光学精密工程, 2016, 24(6): 1474–1481.