

超连续谱光源辐照可见光 CMOS 图像传感器的实验研究

王景楠, 聂劲松

(电子工程学院 脉冲功率激光技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230037)

摘要: 研究了超连续谱光源对可见光 CMOS 图像传感器辐照的实验现象和规律。观察到随着入射激光功率的不断增大, CMOS 图像传感器依次出现了像元饱和、局部饱和、局部过饱和以及全屏饱和等现象。与 1 060 nm 锁模光纤激光辐照同种图像传感器的实验相对比, 从有效干扰面积、图像相关度及图像均方差等三个方面, 对比了两种干扰源在影响 CMOS 图像传感器成像质量方面的异同, 发现 CMOS 图像传感器的响应特性、激光的频谱特性和成像光学系统的色散是导致干扰效果差异的主要原因。

关键词: 超连续谱; 锁模激光; CMOS; 激光干扰对比

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0106004

Experimental study on supercontinuum laser irradiating a visible light CMOS imaging sensor

Wang Jingnan, Nie Jinsong

(State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

Abstract: The experimental phenomena and laws of the supercontinuum laser irradiating the visible light CMOS image sensor were studied. Some typical interference phenomenon was observed with the incident laser power increasing, like pixels saturation, partial saturation, local supersaturation and full screen saturation of the output image with CMOS sensor. A comparison of the similarities and differences between the 1 060 nm mode-locked fiber laser and supercontinuum on affecting the quality of CMOS imagers was described from three aspects such as effective jamming area, image correlation and image variance. It is found that the response characteristic of CMOS image sensor, the spectrum characteristic of the laser and the dispersion of the imaging optical system lead to the difference of interference effects.

Key words: supercontinuum; mode-locked laser; CMOS; laser interference contrast

收稿日期: 2016-05-11; 修订日期: 2016-06-21

基金项目: 脉冲功率激光技术国家重点实验室基金(SKL2014ZR09)

作者简介: 王景楠(1990-), 男, 硕士生, 主要从事超连续谱方面的研究。Email: q2214693@126.com

导师简介: 聂劲松(1970-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事激光技术方面的研究。Email: njs7001@sina.com

0 引言

超连续谱光源以其优良的宽谱特性在诸如光谱检测、光学频率计量、生物医学等多个方面和领域有着重要的应用^[1]。尤其在对加装滤波装置的光电成像系统的干扰和损伤方面，相较于单模激光有着较为明显的优势。

随着技术的发展,以 CMOS(Complementary Metal Oxide Semiconductor)图像传感器为核心的探测成像系统由于其高集成度、低功耗、高读出速率等特点得到了广泛的应用^[2-3]。在光电对抗领域,激光常常被用于对 CMOS 成像系统的致盲、致眩、饱和及扰乱。当前,激光干扰 CMOS 成像器件的研究已经普遍开展,获得了较多的实验结果,但超连续谱光源干扰 CMOS 成像器件的研究还较少^[4-6]。文中研究了超连续谱光源对可见光 CMOS 图像传感器辐照的实验现象和规律。与 1 060 nm 锁模光纤激光辐照实验相比较,描述了两种干扰源下 CMOS 输出图像呈现出的像元饱和、局部饱和、局部过饱和及全屏饱和等干扰现象;从有效干扰面积、图像相关度和图像均方差等多个角度分析对比了两者干扰效果,总结了产生差异的原因。

1 实验平台及方法

实验系统布局如图 1 所示,主要包括激光源、激光传输光路、功率衰减装置、激光功率实时测量装置,激光探测和记录装置等。

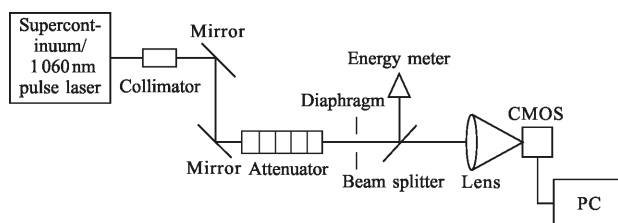
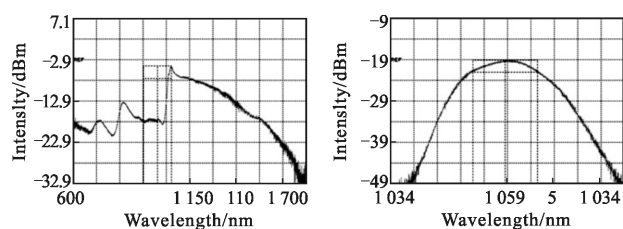


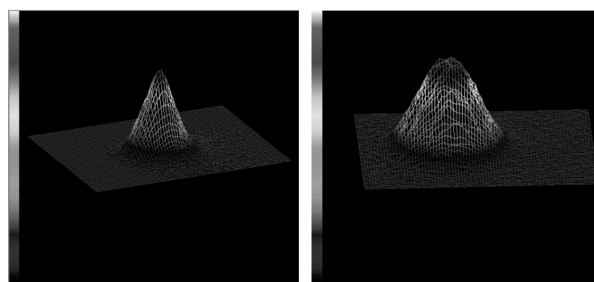
图 1 实验平台布局
Fig.1 Experimental set-up

实验采用自行搭建的全光纤化超连续谱光源和锁模光纤激光器分别作为干扰光源。其中,锁模光纤激光器利用非线性偏振旋转效应的环形腔实现被动锁模^[7],经两级 MOPA 使得最大输出功率达到 0.92 W,

中心波长为 1 060 nm,重复频率为 22.3 MHz。泵浦 NKT Photonics 公司的 SC-5.0-1040 型号光子晶体光纤,得到了覆盖 600~1 700 nm 频段的超连续谱,最大输出功率可达 0.34 W。输出激光频谱特性和光斑能量分布如图 2 所示。经准直器准直后,发散角分别为 1.2 mrad 和 0.9 mrad。



(a) 超连续谱输出频谱
(a) Supercontinuum output spectrum
(b) 锁模脉冲频谱
(b) Mode-locked pulse spectrum



(c) 超连续谱光斑能量分布
(c) Supercontinuum spot energy distribution
(d) 锁模脉冲激光光斑能量分布
(d) Mode-locked pulse laser spot energy distribution

图 2 干扰光源输出脉冲频谱特性及光斑能量分布
Fig.2 Spectral characteristics of the interference light source's pulse and the energy distribution of the spot

激光传输光路由反射镜、分光镜和成像镜头等组成。通过改变功率衰减装置中衰减片的数量来控制干扰激光功率。分光镜分出一束小功率激光用于激光脉冲功率的实时监控。所采用的 CMOS 图像传感器为 PointGrey 公司的 FMVU-03MTM 型工业相机,其采用 1/3 in 靶面,像元尺寸为 6.0 μm。连接计算机,对获取的图像进行采集和整理。

2 实验现象及结果分析

由于 CMOS 传感器的像元内放大、列并行结构,激光对其辐照干扰时,不会出现类似于对 CCD 辐照

时产生的串扰现象^[2,3]。因此,随着辐照激光功率的增加,CMOS 图像传感器输出的图像会出现像元饱和、局部饱和、局部过饱和以及全屏饱和等现象^[5,9]。

超连续谱光和脉冲激光无本质性区别,同属于激光范畴,除不具有较好的时间相干性外,其余性质均相同,故其对图像传感器的干扰现象应大体无异。另外,由于文中不以局部像元的饱和、损伤阈值为研究对象,着眼于成像系统的整体被干扰效果。因此,成像系统的入瞳功率可用于表征激光参数,并且在某些领域中也是一个有效参数。

图 3 中描述了不同功率的超连续谱对 CMOS 图像传感器的干扰现象,依次是像元饱和、局部饱和、局部过饱和以及全屏饱和的典型干扰现象。其中,图3(c)、(d)中心为像元过饱和形成的黑斑,与参考文献[5]中 632.8 nm 连续激光辐照 CMOS 相机实验中观察到实验现象一致。分析其原因可能为 CMOS 传感器信号处理电路中的相关双采样 (Correlated Double Sampling, CDS)技术的运用^[2]。

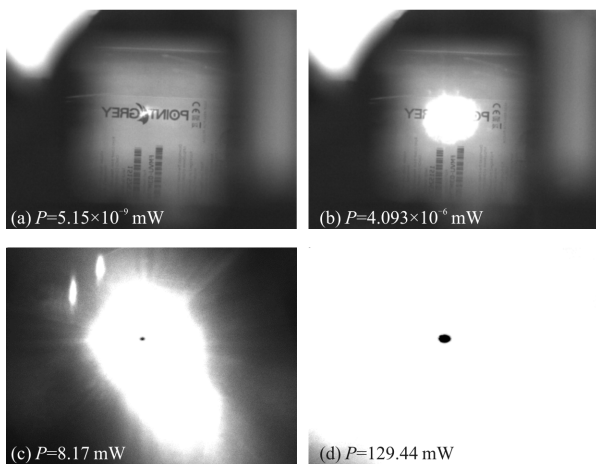


图 3 超连续谱辐照可见光 CMOS 的干扰现象

Fig.3 Interference phenomenon of the visible light CMOS irradiated by supercontinuum

因超连续谱包含着丰富的频谱成分,对于实验中的透射式成像镜头会存在较为严重的色散现象,每一波长激光经镜头聚焦后的焦平面相互独立、不重合,导致超连续谱在 CMOS 光敏面上的光斑较大。且由于其光强远大于探测的可见光,将会在 CMOS 输出图像上产生一个较大的亮斑,如图 4 所示。该亮斑所对应的灰度值并未达到 255,即此时并未发生像元饱和现象。

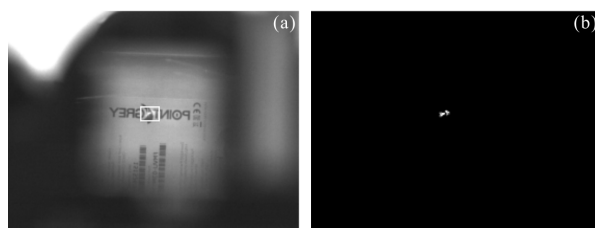


图 4 功率为 1.03×10^{-9} mW 的超连续谱辐照 CMOS 的图像及其二值图像

Fig.4 Output image and two value image of CMOS irradiated by supercontinuum with power of 1.03×10^{-9} mW

3 干扰对比分析

为了更加准确地对比分析两种干扰源辐照可见光 CMOS 图像传感器的干扰效果,需要对 CMOS 受干扰后的成像质量进行定量的描述,现从有效干扰面积、图像相关度以及图像均方差等三个方面对两种情况下激光干扰 CMOS 传感器的效果进行对比分析^[5,10-12]。

3.1 有效干扰面积

由于成像系统存在色差,超连续谱和锁模脉冲激光在 CMOS 光敏面上形成的光斑有较大的差异,因此比较两者的有效干扰面积有着重要的意义,可以对其干扰效果进行较为合理的评价。

定义有效干扰面积为由激光辐照引起的输出图像灰度值变化的面积与输出图像面积的比值。其中,由激光辐照引起的输出图像灰度值变化的面积即光斑面积,其边缘灰度值^[8]为光斑中心最大灰度值的 $1/e^2$,即对应中心最大灰度值为 255 的光斑边缘灰度值应为 35。分别对多组 CMOS 输出图像有效干扰面积进行计算,得出了超连续谱及锁模脉冲激光辐照 CMOS 的有效干扰面积与入射激光功率的变化关系,如图 5 所示。

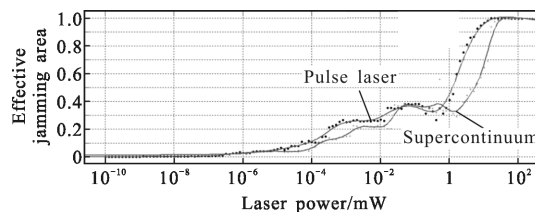


图 5 有效干扰面积随入射功率的变化曲线

Fig.5 Variation of effective jamming area with the incident power

由图 5 所示的关系曲线,可得出如下结论:

超连续谱和锁模脉冲激光对 CMOS 传感器引起的有效干扰面积变化不是线性的,而是随着入射激光功率先缓慢增加,当功率增加一定程度时,干扰面积快速增大,最后趋于平缓甚至下降。初始阶段缓慢增加可能因为随着入射光功率的增加,激光光斑外延的功率逐渐增大超过像元的饱和阈值,使有效干扰面积增大,因其光斑能量分布满足高斯分布(如图 2 所示),故增长较为缓慢;但当入射光功率达到一定的功率后,像元内硅光电二极管光敏面与像元外表层玻璃之间的反射光便会增强,对多个像元成像产生影响。随着光功率的增加,反射光的作用快速增强,加之激光光斑外延功率的增长,有效干扰面积便会快速增大,直至扩展至整个 CMOS 感光面;最后,由于光斑中心出现过饱和现象,使得文中定义的有效干扰面积有所下降。

入射光功率较小时,超连续谱引起的有效干扰面积稍大于锁模脉冲激光的有效干扰面积,而在入射光功率较大时锁模脉冲激光产生的有效干扰面积占据优势,并以更小的入射功率使得 CMOS 图像传感器达到全屏饱和。这一现象的可能原因是:在光功率较小时,有效干扰面积主要受一次像元入射激光功率的影响,因超连续谱频谱成分较丰富,结合硅光电二极管的光谱响应特性^[13]可知,超连续谱的能量利用率较高,且由于其成像系统色差导致的光斑面积较大。

当光功率较大(超过 10^{-6} mW)时,锁模脉冲激光由于功率完全集中在 1 060 nm 附近频段内,在像元表面有着更大的功率密度,故其反射光较强,由此引起的有效干扰面积快速增大作用更加显著,故可以较超连续谱获得更大的有效干扰面积;

在达到全屏饱和(功率达到 10^2 mW)后,因超连续谱在 CMOS 感光面上有着较大的光斑面积,可产生较大的过饱和面积,从而使文中定义的有效干扰面积有较大幅度的减小。

3.2 图像相关度

选取未入射激光时,图像传感器输出的图像为参考图像,则可利用干扰前后传感器输出的图像即干扰后图像与参考图像之间的各个灰度值的协方差系数来表示图像的相关度^[8],以此描述和评价激光对 CMOS 的干扰效果。其计算公式为:

$$r = \frac{\sum_m \sum_n (A_{mn} - \bar{A})(B_{mn} - \bar{B})}{\sqrt{(\sum_m \sum_n (A_{mn} - \bar{A})^2)(\sum_m \sum_n (B_{mn} - \bar{B})^2)}}$$

式中: A_{mn}, B_{mn} 分别表示参考图像和干扰后图像中 m 行 n 列的灰度值; \bar{A}, \bar{B} 分别表示参考图像和干扰后图像的平均灰度值。通过计算,分别获得了两种干扰源对可见光 CMOS 图像传感器作用前后输出图像的相关度与入射光功率的关系曲线,如图 6 所示。

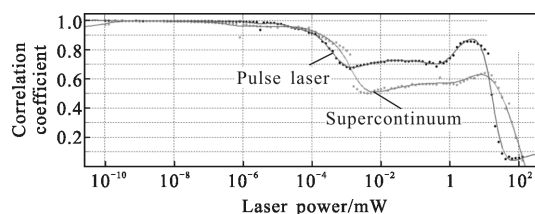


图 6 图像相关度随入射功率的变化曲线

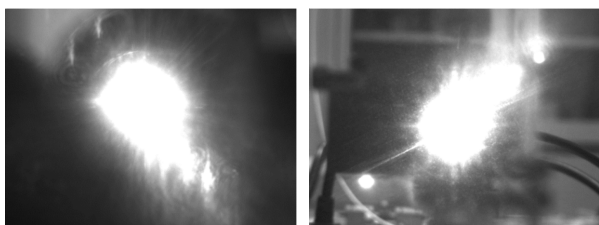
Fig.6 Variation of image correlation with incident power

与有效干扰面积随入瞳功率的变化规律类似,激光引起图像相关度变化与功率之间的关系不是线性的。在光功率较小时,表现为缓慢变化;当功率增大后,便发生剧烈变化,迅速降低。不同的是在激光功率约为 $10^{-2} \sim 1$ mW 范围内,两种激光引起的图像相关度变化趋于平稳,甚至有升高的现象,锁模脉冲激光表现的较为明显。对比该功率范围内,有效干扰面积的变化曲线,可发现,这一段内有效干扰面积的扩展速度也有很大程度的变慢。分析其可能原因是由探测器成像系统“猫眼”效应引起的回波沿探测光路逆向照射目标,使得探测器对目标的探测能力增强。而由于回波功率与成像系统的色差、离焦量等因素^[14-15]有关,锁模脉冲激光引起的回波功率较大,对目标的“照明”作用更强,故其较超连续谱引起的图像相关度有着一个较大的提高。

随着入射光功率的提高,即干扰作用的增强,图像相关度会大幅下降。由于锁模脉冲激光的光功率在频域上较为集中,仅分布在 1 060 nm 附近极窄的频段内,故其引起的图像相关度下降较快,这与其较小的全屏饱和阈值相对应。当功率相当大且未达到损伤阈值时,由于超连续谱的过饱和现象更加显著,其引起的图像相关度降低便占据优势,表现为其能使图像相关度降到更低。

当超连续谱的功率为 1.63×10^{-3} mW 时,可观察

到其与参考图像的相关度有一突变,输出图像表现为目标信息全部丢失,无法用肉眼观察到,而同功率的锁模脉冲没有出现该现象,如图 7 所示。分析其原因可能与实验用可见光 CMOS 相机采用的硅光电二极管作为探测单元和图像处理的自适应算法^[6]有关。由典型硅光电二极管光谱响应特性^[3]可知:在 1 060 nm 处,其归一化响应率仅为 0.3 左右,而实验用超连续谱则覆盖了其大部分响应曲线,在后续图像处理的自适应算法作用下,探测器对弱光目标的探测能力有所下降。同时,超连续谱的"猫眼"效应回波较弱,对目标的照明效果较差。因此,在此功率下,超连续谱的干扰效果较好。这也解释了在未达到全屏饱和前,超连续谱的干扰能使得输出图像的相关度更低的原因。



(a) 超连续谱辐照 CMOS (b) 锁模脉冲激光辐照 CMOS
(a) CMOS irradiated by supercontinuum (b) CMOS irradiated by mode-locked pulse laser

图 7 功率为 1.63×10^{-3} mW 的激光辐照 CMOS 的输出图像

Fig.7 Output image of CMOS irradiated by laser with the power of 1.63×10^{-3} mW

3.3 图像均方差

为进一步验证上述得出的结论,计算干扰后图像与参考图像的均方差进行对比分析。均方差法(Mean Square Error, MSE)是一种全参考质量评价算法^[10],可以较好地评价 CMOS 成像受激光干扰的程度,是基于像素误差统计的典型模型算法。其计算公式为:

$$\alpha_{\text{MSE}} = \frac{1}{MN} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} \|C(i, j) - D(i, j)\|^2$$

式中: $C(i, j)$ 和 $D(i, j)$ 分别表示参考图像和测试图像第 i 行第 j 列的像素灰度值。

由均方差随入射光功率的变化曲线(见图 8)可知,其变化趋势与有效干扰面积、图像相关度随入射光功率的变化趋势相同。在入射光功率较小时,光斑面积在干扰中占优,可引起更多像元灰度值发生变

化,即此时超连续谱引起的干扰效果较好;当光功率达到某一阈值时,锁模脉冲激光频域能量分布集中的优势变得更加明显,使得 CMOS 传感器输出图像质量迅速下降;但随着激光功率的进一步提升,超连续谱分布在各频段内,尤其是 600~1 100 nm 范围内的光功率达到某一阈值后,其在 CMOS 感光面上的光斑面积较大便再次凸显优势,使得其输出图像质量急剧下降,超过锁模脉冲激光的干扰效果。两种干扰源对可见光 CMOS 传感器的干扰效果不会无限制地增大,变化曲线中表现为均方差达到某一最大值并趋于平稳。

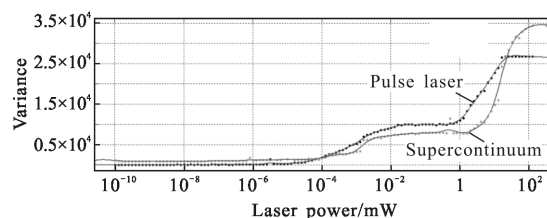


图 8 图像均方差随入射功率的变化曲线

Fig.8 Variation of image mean square deviation with incident power

4 结论

利用自行搭建的 1 060 nm 锁模光纤激光器及以此为泵浦源产生的超连续谱分别进行了对可见光 CMOS 辐照实验,观察到随着入射激光功率的不断增大,CMOS 传感器依次出现了像元饱和、局部饱和、局部过饱和以及全屏饱和等现象。从有效干扰面积、图像相关度及图像均方差等三个方面,对比了两种干扰源在影响 CMOS 成像质量方面的异同。发现:(1) 两种干扰源对 CMOS 成像的干扰效果均不随入射功率线性变化,而是先缓慢增加,再快速增强,最后到达某一最大干扰效果;(2) 在功率较低时,超连续谱对可见光 CMOS 的干扰效果较锁模激光的干扰效果有一定的优势,但当功率较大时,锁模激光因频谱单一、功率较为集中,便迅速超越超连续谱的干扰效果。分析产生上述现象的原因主要是 CMOS 图像传感器的响应特性、光谱的频谱特性和成像光学系统的色散等因素。

参考文献:

[1] John M Dudley, Goëry Genty. Supercontinuum light [J]. *Phys Today*, 2013, 66(7): 29-37.

- [2] Song Min, Gui Xinkai, Zheng Yaru. Comparison of detection performance in CCD and CMOS image sensor [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2005, 26(1): 5–9. (in Chinese)
宋敏, 邹新凯, 郑亚茹. CCD 与 CMOS 图像传感器探测性能比较[J]. 半导体光电, 2005, 26(1): 5–9.
- [3] Wang Xudong, Ye Yutang. Comparative research and future tendency between CMOS and CCD image sensor [J]. *Electronic Design Engineering*, 2010, 18(11): 178–181. (in Chinese)
王旭东, 叶玉堂. CMOS 与 CCD 图像传感器的比较研究和发展趋势[J]. 电子设计工程, 2010, 18(11): 178–181.
- [4] 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(6): 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(6): 16–17.
- [5] Sheng Liang, Zhang Zhen, Zhang Jingmin, et al. Experimental study on a visible light CMOS camera irradiated by 632.8 nm CW laser [J]. *Modern Applied Physics*, 2015, 6 (3): 181–185. (in Chinese)
盛良, 张震, 张检民, 等. 632.8 nm 连续激光辐照可见光 CMOS 相机实验研究[J]. 现代应用物理, 2015, 6(3): 181–185.
- [6] Zhu Chen, Li Yao, Wang Xiongfei, et al. Experiment study of interference of super-continuum light source on CMOS photodetectors [J]. *Laser & Infrared*, 2014, 44(4): 374–377. (in Chinese)
朱辰, 李尧, 王雄飞, 等. 超连续谱光源对 CMOS 图像传感器的干扰实验研究[J]. 激光与红外, 2014, 44(4): 374–377.
- [7] Tarek Ennejah, Rabah Attia. Mode locked fiber lasers [Z]. *Current Developments in Optical Fiber Technology*, InTech, 2013: 405–426.
- [8] Shao Ming, Zhang Le, Zhang Leilei, et al. Comparative study on saturation effect of 1.06 μm 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 μm 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.
- [9] Luo Qun. Study of disturb effect to array CCD detectors irradiated by broadband source [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008. (in Chinese)
罗群. 宽光谱光源对可见光 CCD 的干扰效应研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008.
- [10] Che Jinxi, Wang Dong, Zhang Hengwei, et al. Influence of laser parameters on jamming effectiveness of IR imaging system [J]. *Journal of Applied Optics*, 2011, 32 (5): 992–997. (in Chinese)
车进喜, 王东, 张恒伟, 等. 激光参数对红外成像系统干扰效果影响的实验研究[J]. 应用光学, 2011, 32 (5): 992–997.
- [11] Sun Yunqiang, Cheng Xiang' ai, Wang Fei, et al. Method of quality evaluation aimed at laser disturbing image [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(5): 659–662. (in Chinese)
孙运强, 程湘爱, 王飞, 等. 一种针对激光干扰图像的质量评价方法[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(5): 659–662.
- [12] Li Tianqi. Study of pixel photosensitive devices on the CMOS image sensor [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2013. (in Chinese)
李天琦. CMOS 图像传感器像素光敏器件研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.
- [13] Zhang Xue'ao, Wu Hao, Zhang Hailiang, et al. Analysis on spectrum response of silicon photoelectric diode [J]. *Physical Experiment of College*, 2011, 24(2): 25–27. (in Chinese)
张学骛, 吴昊, 张海良, 等. 硅光电二极管光谱响应度的分析[J]. 大学物理实验, 2011, 24(2): 25–27.
- [14] Zhang Bo, Niu Yanxiong, Zhang Chu, et al. Analysis of influence factors for reflected wave power of "cat-eye" target [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38 (3): 420–423. (in Chinese)
张博, 牛燕雄, 张雏, 等. “猫眼”目标回波功率的影响因素分析[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(3): 420–423.
- [15] Dou Xian'an, Sun Xiaoquan, Zhang Chuangxin. Theory and experiment of influence of chromatic aberration on cat-eye system echo [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2011, 26(2): 35–38. (in Chinese)
豆贤安, 孙晓泉, 张创新. 色差对猫眼系统回波影响的理论与实验[J]. 光电技术应用, 2011, 26(2): 35–38.
- [16] Gan Bo, Wei Tingcun, Zheng Ran. Auto white balance algorithm for CMOS image sensor chip [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2011, 26(2): 224–228. (in Chinese)
甘波, 魏廷存, 郑然. CMOS 图像传感器芯片的自动白平衡算法[J]. 液晶与显示, 2011, 26(2): 224–228.