

探测器增益对激光干扰效果的影响研究

王彦斌 王国良 陈前荣 李 华 邹前进 王 敏

中国洛阳电子装备试验中心, 河南 洛阳 471003

摘要 实验研究了探测器增益对激光干扰效果的影响。测试了暗背景下、无激光干扰时 CCD 在不同增益下输出图像的噪声分布和灰度量级, 确定了噪声灰度均值随 CCD 增益增加的变化关系。通过比较不同增益下的激光光斑图像和灰度分布, 发现增大 CCD 增益, 可以放大激光主光斑周围的弱光信号, 增加饱和像元数, 增大干扰面积, 提高激光对 CCD 的干扰效果, 并确定了信号灰度随 CCD 增益增加的变化关系。基于信号、噪声灰度与 CCD 增益之间的变化关系, 实现了不同增益下激光干扰效果的仿真。该研究结果可为评估光电成像系统在不同增益下的激光干扰效果提供技术支持和理论参考。

关键词 探测器; CCD 增益; 噪声分布; 饱和像元数; 激光干扰效果

中图分类号 TN249 文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.s102016

Influence of Detector's Gain on Laser Disturbing Effect

Wang Yanbin Wang Guoliang Chen Qianrong Li Hua Zou Qianjin Wang Min

Luoyang Electronic Equipment Test Center of China, Luoyang, Henan 471003, China

Abstract The influence of detector's gain on laser disturbing effect has been investigated in the experiment. We firstly measure the noise distribution and grey scale of output image under the different CCD gains, and then define the variable relation of noise grey scale with the increase of CCD gain. According to comparing laser spot image and grey scale distribution under the different gains, it is secondly found that the increase of CCD gain can amplify the weak signal around laser main spot, add the number of saturated pixel and enhance laser disturbing effect. The variable relation between signal grey scale and CCD gain has been also defined by calculating signal grey scale. At last, it is can be achieved to simulate laser disturbing effect under the different gains based on the relation of signal/noise grey scale and CCD gain. The research results can provide technical support and theoretical reference for evaluating laser disturbing effect of electro-optical imaging system under the different gains.

Key words detectors; CCD gain; noise distribution; the number of saturated pixel; laser disturbing effect

OCIS codes 040.1520; 140.3460

1 引 言

电荷耦合器件(CCD)是目前最常用的光电探测器之一,因其具有体积小、功耗低、灵敏度高、动态范围大等优点,而被广泛应用于工业、农业、科研、军事等领域^[1-3]。典型的 CCD 光电成像系统主要由光学镜头、CCD 芯片、驱动电路、信号处理电路、电子接口电路等组件构成。光学镜头将目标/背景成像在 CCD 芯片上,CCD 芯片在驱动电路产生的脉冲信号作用下实现光电荷的转换、存储、转移和输出,从而将二维的光学信息转换为一维的电信号输出;信号处理电路接收一维电信号,进行采样保持、相关双采样、放大电路、数模转换等处理后,合成所需要的图像视频信号输出。由此可知,CCD 之所以能够达到极高的光探测灵敏度,一方面源于 CCD 芯片选取高响应的感光材料和精密的制作工艺,另一方面与其独特的采样算法和放大处理电路密切相关。其中,CCD 的放大处理电路直接决定电信号的放大倍数,即 CCD 的增益范围,一般采用 dB 为单位。

然而,任何事物都有其两面性,CCD 具有极高的光探测灵敏度,也使得其极容易受到强激光的干扰和损伤^[4-6]。近年来,人们对于激光辐照 CCD 干扰效应的研究,已有大量的文献资料报道,观察到了许多新奇的

收稿日期: 2015-01-14; 收到修改稿日期: 2015-03-10

作者简介: 王彦斌(1982—),男,博士,助理研究员,主要从事光电对抗技术方面的研究。E-mail: wangyanbin82@163.com

实验现象(包括饱和、过饱和、串扰、硬破坏等)^[4-5,7],测量了 CCD 产生不同现象时的阈值(包括饱和阈值、过饱和阈值、串扰阈值、硬破坏阈值)^[4,8-9],分析了 CCD 产生不同现象的潜在机理,研究评估了激光对 CCD 的干扰效果^[10-11]。然而,由于常见的 CCD 相机多是采用自动增益控制,即随着环境照度的变化自动地调整放大处理电路的增益范围,并且背景杂散光的影响难以完全滤除,所以关于探测器增益对激光干扰效果的影响研究并不多见。本文采用探测器增益可以灵活设置的科研 CCD 相机,在严格消光的光学暗室开展测试实验,研究了探测器在不同增益下的噪声水平以及不同增益对激光干扰效果的影响。

2 不同增益下的探测器噪声

图 1 是实验中将要采用的北京联合赛仪科技有限公司代理的型号 DMK23G 445 的 CCD 相机,它采用 Sony ICX445ALA 芯片,具体参数有:光敏面对角线长度 1/3"、像元规模 1280(H)×960(V)、像元尺寸 3.75 μm,CCD 放大电路的增益设置范围 0 dB~30 dB。该 CCD 输出黑白图像,像元灰度级范围 0~4096。为准确研究探测器增益对激光干扰效果的影响,需要首先测试暗背景(无任何杂光干扰)、无激光干扰时该 CCD 在不同增益下输出图像的噪声灰度分布,评估其噪声水平。为准确测试 CCD 的噪声水平,避免外界(太阳光、灯光等)杂散光的干扰,测试工作在本课题目的光学暗室进行,光学暗室的地面、墙壁和顶棚都喷涂了消光漆,做了非常严格的消光处理,从而保证测试结果的准确性。



图 1 DMK23G445 CCD

Fig. 1 DMK23G445 CCD

图 2 显示了暗背景、无激光干扰时不同增益下 CCD 输出图像的噪声灰度分布概率。图 2(a)无探测器增益时,出现概率最大的是灰度值 2 以下的像元,约为 35%,噪声灰度均值为 4.83,由于此时没有设置探测器增益,所以该值可作为 CCD 噪声灰度均值的初始值,约为最大灰度级 4096 的 0.1%,说明该 CCD 的自身噪声非常低。另外,噪声灰度值均在 18 以下,噪声灰度分布的均方差为 0.59,说明该 CCD 输出具有较好的均匀性和一致性。由描述增益的常用公式表示:

$$y = a \lg\left(\frac{x}{b}\right), \quad (1)$$

式中 x 是某一增益下的像元灰度值, y 是对应的探测器增益, a 是增益公式中的系数,一般是 10 或者 20, b 是像元灰度的初始值。由 CCD 噪声灰度均值的初始值 4.83,可以得到该 CCD 噪声灰度均值的增益公式

$$y = a \lg\left(\frac{x}{4.83}\right). \quad (2)$$

图 2(b)探测器增益为 10dB 时,出现概率最大的是灰度值 3 以下的像元,但也降为 10%左右,噪声灰度均值增大为 14.57,说明增大探测器的设置增益以后,CCD 的自身噪声被放大了。图 2(c)探测器设置增益为 20 dB 时,出现概率最大的是灰度值 10 以下的像元,概率降为不足 3.5%,噪声灰度均值增大到 47.66。图 2(d)探测器增益设置为 30 dB 时,出现概率最大的是灰度值 50 以下的像元,约为 0.8%,噪声灰度均值最终增大到 162.7。表 1 详细给出了不同增益下 CCD 噪声的灰度均值、均方差,以及均方差与均值的比值,可见随着探测器增益的增大,灰度均值增大,均方差增大,但是均方差与均值的比值却稳定在 0.12 左右,说明放大电路对噪声的增益放大较为均匀。

依据表 1 的测试结果,图 3 做出了 CCD 噪声灰度均值随探测器增益逐渐增大的变化趋势,如图中小圆圈所示;同时根据(2)式分别画出了 $a=10$ (实线)和 $a=20$ (虚线)时噪声灰度均值随 CCD 增益增大的变化曲线,可以看到小圆圈的变化趋势与 $a=20$ (虚线)时的变化曲线重合得非常好,这一方面就确定了该 CCD 噪声灰度均值随其增益的变化关系,即(2)式所示,并且系数 a 应选取 20;另一方面也说明在增大 CCD 增益的

过程中,不仅可以放大输入信号,而且对其自身噪声也进行了放大。

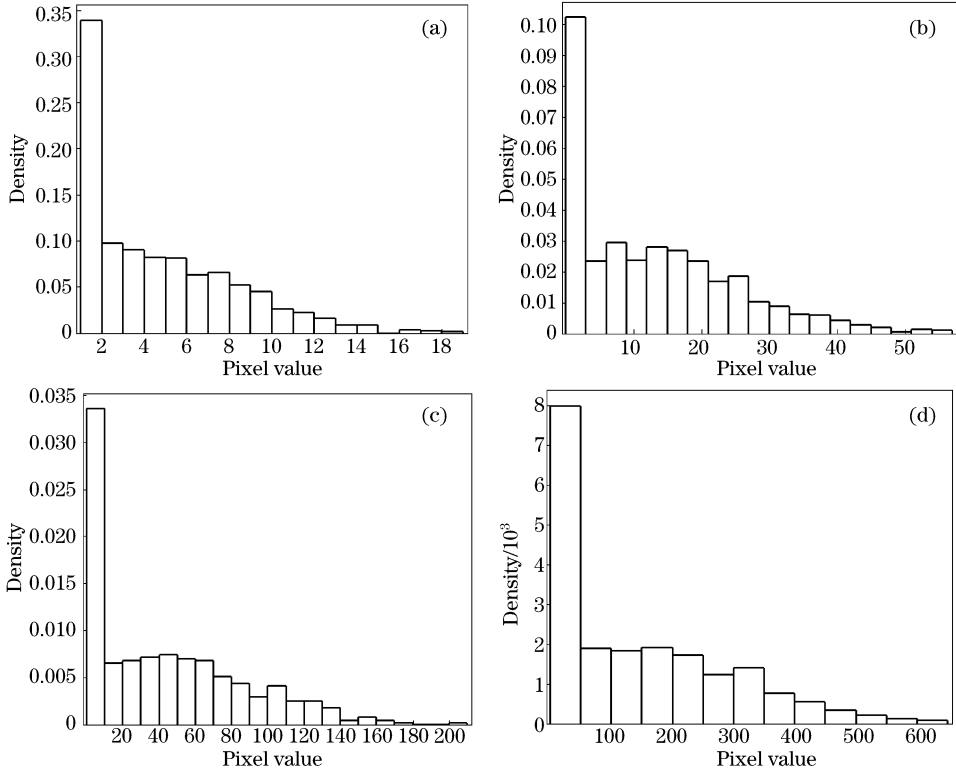


图 2 不同增益下 CCD 噪声的灰度分布概率

Fig. 2 Distribution probability of CCD noise under the different gains

表 1 不同增益下 CCD 的噪声水平

Table 1 CCD noise under the different gains

Detector's gain/dB	Mean value of noise grayscale	Mean square deviation of noise grayscale	Ratio of mean square devi ation and mean value
0	4.83	0.59	0.122
2	6.02	0.76	0.126
4	7.45	0.93	0.125
6	9.23	1.18	0.127
8	11.63	1.47	0.126
10	14.57	1.87	0.128
12	18.31	2.35	0.128
14	23.34	2.84	0.122
16	29.65	3.54	0.119
18	37.39	4.55	0.122
20	47.66	5.46	0.115
25	87.50	9.05	0.103
30	162.7	15.2	0.100

3 探测器增益对激光干扰效果的影响

由于型号 DMK23G445 CCD 的响应波段是可见光波段,所以实验采用波长 532 nm 的激光器对该 CCD 进行照射干扰。532 nm 激光器是由北京镭宝激光技术有限公司生产的 Nd:YAG 激光器,采用电光调 Q 方式输出 1064 nm 激光,再通过非线性变换输出 532 nm 激光。光束发散角为 3 mrad,单脉冲能量 50 mJ,重复频率 10 Hz。为避免激光损伤 CCD,干扰前先将其输出能量衰减 130 dB,输出功率约为 5×10^{-14} W,作用距

离调至 29.5 m。CCD 相机的光学镜头部分通过调焦使其对工作距离大于 0.5 m 的范围清晰成像,然后关闭所有光源, F 数设置为 16,开始干扰实验。

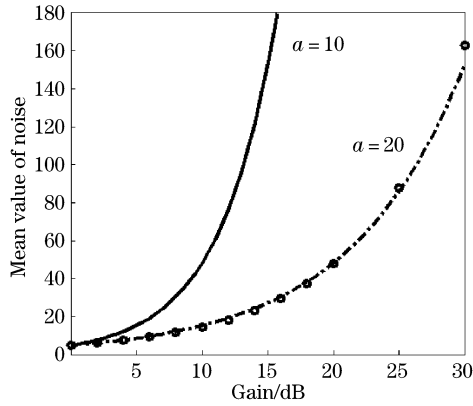


图 3 不同增益下探测器的噪声水平

Fig. 3 Noise standard of CCD under the different gains

图 4 显示了保持激光发射参数不变,逐渐增加探测器增益的激光干扰效果。图 4(a)没有探测器增益时,激光光斑在 CCD 输出图像上并不明显;图 4(b)探测器增益设置为 10 dB 时,激光光斑在 CCD 输出图像上开始显现;图 4(c)探测器增益设置为 20 dB 时,激光光斑清晰可见;图 4(d)探测器增益设置为 30 dB 时,激光光斑更加清晰,并且光斑面积得以增大。可见,增大探测器的增益,可以增大激光光斑面积,提高激光对 CCD 的干扰效果。

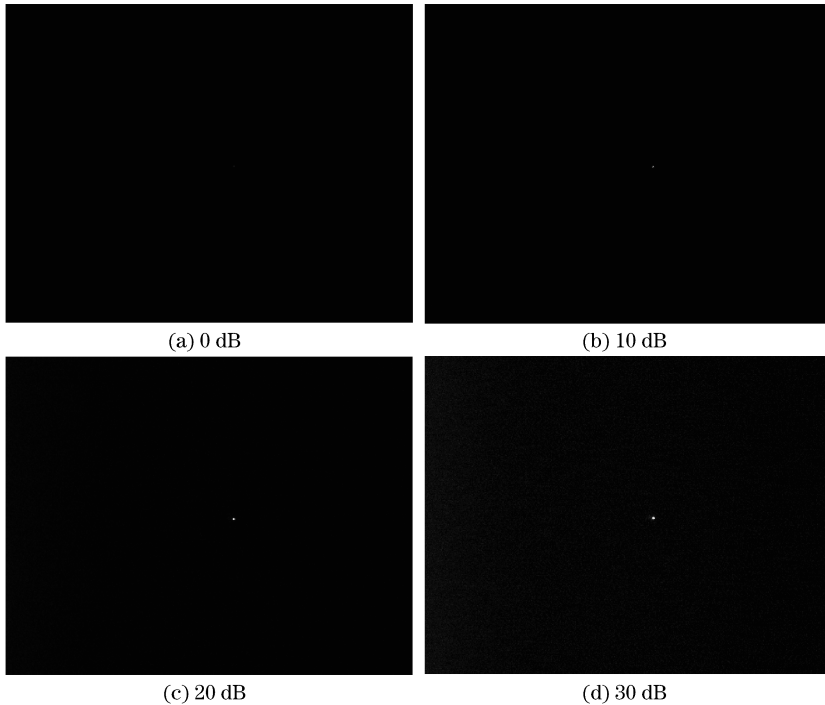


图 4 不同增益下的激光干扰效果

Fig. 4 Laser disturbing effect under the different gains

为进一步研究增大探测器增益是如何增大光斑面积、提高激光干扰效果的,图 5 给出了不同增益下激光光斑区域的灰度分布,图 5(a)是没有增益的激光光斑灰度分布,像元的最大灰度值为 3892,并没有达到饱和,灰度分布以灰度值为 3892 的像元为中心,向周围逐渐减小。图 5(b)探测器增益为 10 dB 时,统计饱和和像元数为 8 个,对比图 5(a)可以由(1)式参数 a 取 20 计算发现,这 8 个像元是由图 2(a)中灰度 3892 像元周围灰度值大于 1290 的几个像元放大 10 dB 产生的,由图 2(a)可知,探测器没有设置增益时,噪声灰度均值为 4.83,最大灰度值不足 20,所以灰度值大于 1290 的那些像元显然不是噪声,而是激光主光斑周围的弱光信

号。图 5(c)探测器增益为 20 dB 时,饱和像元数增加到 16 个,对比图 5(a)可由(1)式计算发现,这 16 个像元是由图 2(a)中灰度 3892 像元周围灰度值大于 410 的像元放大 20 dB 产生的,同样这些灰度值大于 410 的像元也是主光斑周围的弱光信号;图 5(d)探测器增益为 30 dB 时,饱和像元数达到了 39 个,可以计算这 39 个像元是由图 5(a)中灰度 3892 像元周围灰度值大于 130 的像元放大 30 dB 产生的。由上述计算分析,发现饱和像元数的增多,干扰效果的提高,源于探测器增益对激光主光斑周围弱信号的放大,信号灰度值随增益增大的放大关系同样满足(1)式,其中系数 a 取 20,参数 b 是没有增益前的信号灰度值。

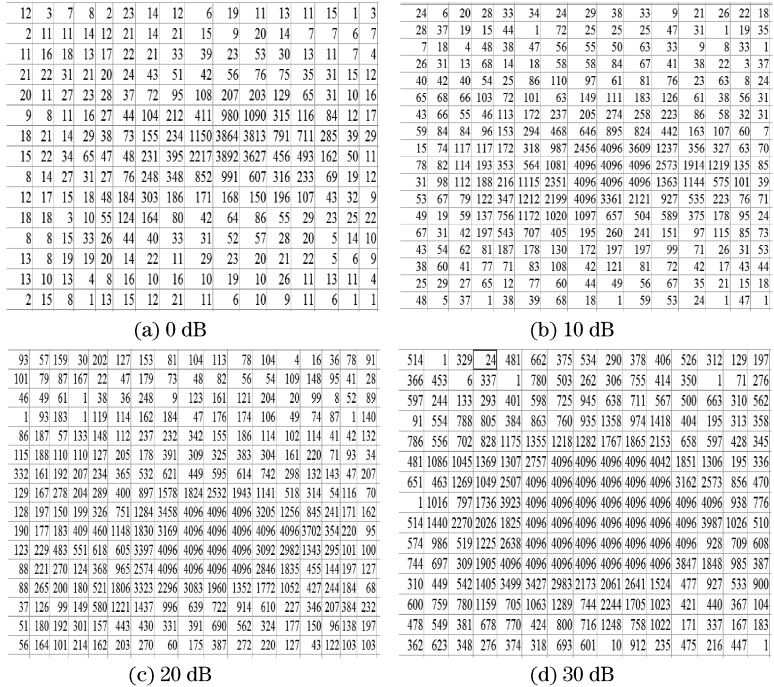


图 5 不同增益下的激光光斑灰度分布

Fig. 5 Grey distribution of laser spot under the different gains

为了更清晰地观察探测器增益对激光干扰效果的提高,采用较高功率的激光对 CCD 进行干扰实验。激光器的输出参数包括:波长 632.8 nm、输出功率 1 mW。图 6(a)和(b)分别是探测器增益为 0 dB 和 30 dB 时的干扰结果,为便于比较,图 7 是把图 6 中含激光光斑的区域单独显示,选择区域的像元规模是 400(H) × 400(V),在图 7(a)中衍射条纹上选择一个像元,对应位置为(474, 876),灰度值 256,在图 7(b)中查找同一像元的灰度值为 4096,由(1)式计算放大倍数 24 dB,同一像元灰度值由 256 增大到 4096,进一步证实了激光干扰面积的增大、干扰效果的提高是探测器增益放大了激光主光斑周围的弱光信号。需要说明的是,灰度值由 256 增大到 4096,放大倍数不是设置的 30 dB,是由于图 7(b)中该像元放大后的灰度级已经达到饱和。

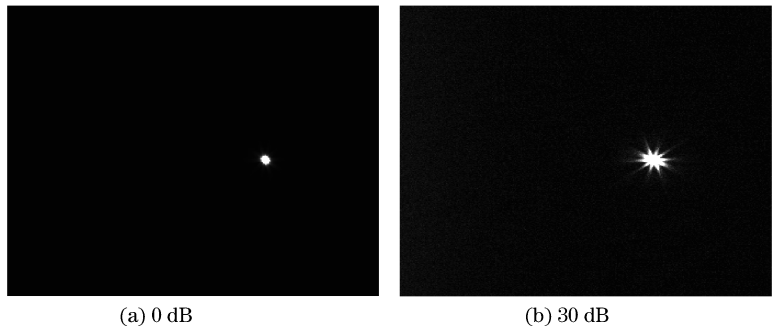


图 6 不同增益下强激光的干扰效果

Fig. 6 Disturbing effect of high power laser under the different gains

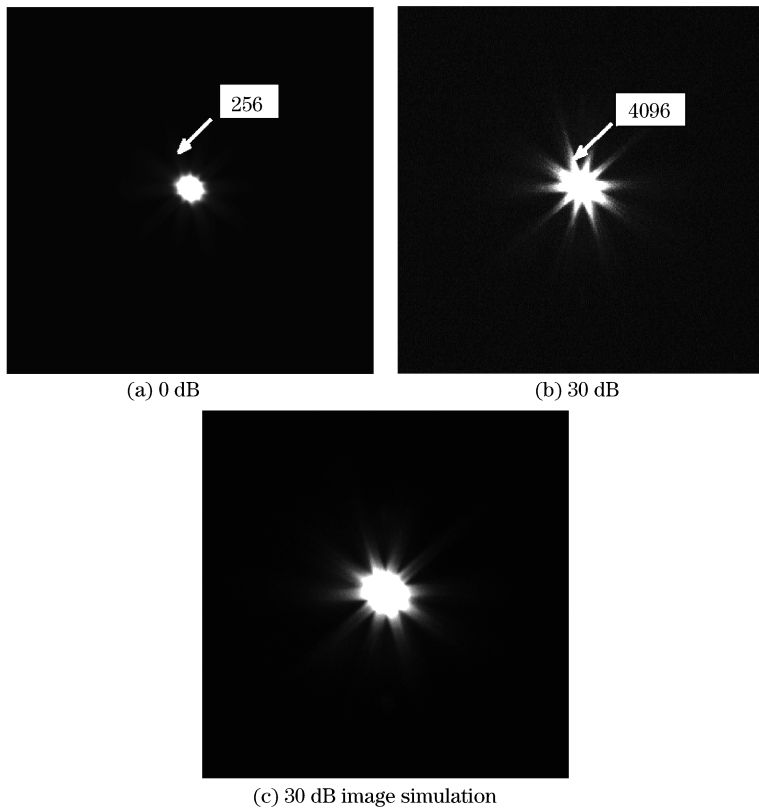


图 7 CCD 增益对主光斑周围光信号的放大

Fig. 7 Amplify of light signal around laser main spot by CCD gains

确定了 CCD 增益对其噪声灰度和信号灰度的放大关系以后,就可以在光电内场基于 CCD 光敏面上的激光能量分布和定标关系,仿真得到无增益时 CCD 输出的激光光斑灰度分布,即激光干扰效应图像,进而由增益关系仿真生成不同增益下的激光干扰效果,实现对激光干扰效果的综合评估。图 7(c)基于图(a)没有增益下的激光光斑灰度分布,仿真生成了增益 30dB 时的激光能量灰度分布,即 30dB 时的激光干扰效应图像。比较图 7(c)和图(b),二者在光斑轮廓和形状上达到了较好的一致,但是细节方面存在差异,这是由于入射激光能量在不同时刻的波动起伏引起的。

4 结 论

本文通过测试 CCD 不同增益下的噪声水平和开展激光对其干扰的实验,研究了 CCD 增益对其噪声和信号的放大关系,以及增大增益对激光干扰效果的影响。研究结果发现,增大 CCD 的增益,可以放大激光主光斑及周围弱光信号,增加饱和像元数,提高激光干扰效果。最后通过确定的 CCD 增益对其噪声和信号的放大关系,可以基于无 CCD 增益下的激光光斑灰度分布,仿真生成任意增益下的激光能量灰度分布,统计各灰度级下的像元数,综合评估不同增益下的激光干扰效果。为电子信息靶场承担激光干扰装备的设计定型实验任务提供技术支撑和有益参考。

参 考 文 献

- 1 Zeng Xiongwen, Lu Qisheng, Zhao Yijun, *et al.*. The photoelectric characteristic research of CCD[J]. High Power Laser and Particle Beams, 1999, 11(1):47-51.
曾雄文,陆启生,赵伊君,等. CCD 的光电特性研究[J]. 强激光与粒子束, 1999, 11(1):47-51.
- 2 Li Haiyan, Zhu Min, Lu Hongyi. Off-axis laser disturbing CCD imaging guidance weapons [J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(1):66-69.
李海燕,朱敏,卢洪义. 视场外激光对 CCD 成像制导武器的干扰研究[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(1):66-69.
- 3 Xing Mailing, Liu Jianping, Lin Jiaming, *et al.*. Distortion measurement of CCD camera with a large-field, short focal length lens [J]. Optical Technique, 2003, 29(3): 377.
行麦玲,刘贱平,林家明,等. 大视场短焦距镜头 CCD 摄像系统的畸变校正[J]. 光学技术, 2003, 29(3): 377.

- 4 Guo Shaofeng, Cheng Xiang'ai, Fu Xiquan, *et al.*. Failure of array CCD irradiated by high-repetitive femto-second laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, 19(11): 1783-1786.
郭少锋, 程湘爱, 傅喜泉, 等. 高重复频率飞秒激光对面阵 CCD 的干扰和破坏[J]. *强激光与粒子束*, 2007, 19(11): 1783-1786.
- 5 Zhang Zhen, Cheng Xiang'ai, Jiang Zongfu. Excessive saturation effect of visible light CCD [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, 20(6): 917-920.
张震, 程湘爱, 姜宗福. 可见光 CCD 的光致过饱和现象[J]. *强激光与粒子束*, 2008, 20(6): 917-920.
- 6 Li Wenyu, Wang Jinbao, Cheng Xiang'ai, *et al.*. New analysis on laser-induced damage mechanism of array CCD device [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(10): 1457-1460.
李文煜, 王金宝, 程湘爱, 等. 激光对面阵 CCD 器件破坏的一种新机理[J]. *强激光与粒子束*, 2005, 17(10): 1457-1460.
- 7 Zhou Jianmin, Fu Youyu, Guo Jin, *et al.*. Research on the soft damage of CCD induced by pulse laser [J]. *Laser Journal*, 2005, 26(2): 20-21.
周建民, 付有余, 郭劲, 等. 脉冲激光对 CCD 的软损伤技术研究[J]. *激光杂志*, 2005, 26(2): 20-21.
- 8 Liu Chang'an, Chen Jinbao, Ma Jinlong, *et al.*. Jamming of visible light array CCD imaging system by infrared laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(8): 1727-1730.
刘长安, 陈金宝, 马金龙, 等. 红外激光对可见光 CCD 成像系统的干扰[J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(8): 1727-1730.
- 9 Wang Siwen, Guo Lihong. Experiment study on the laser dazzling of CCD photoelectric detector [J]. *Laser Journal*, 2009, 30(1): 28-29.
王思雯, 郭立红. 半导体激光器干扰 CCD 光电探测器的实验研究[J]. *激光杂志*, 2009, 30(1): 28-29.
- 10 Xu Yin, Sun Xiaoquan, Shao Li. Impact of laser jamming on target detection performance in CCD imaging system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(4): 989-993.
徐银, 孙晓泉, 邵立. 激光干扰对 CCD 成像系统目标检测性能的影响[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(4): 989-993.
- 11 Zhang C Z, Blarre L D, Walser R M, *et al.*. Mechanisms for laser-induced functional damage to silicon charge-coupled imaging sensors [J]. *App Opt*, 1993, 32(27): 5201-5210.

栏目编辑: 何卓铭