

# 光学系统不同 $F$ 数下的激光干扰效果研究

王彦斌 王国良 陈前荣 王道酉 张文攀 任广森 朱荣臻 李 华

中国洛阳电子装备实验中心, 河南 洛阳 471003

**摘要** 实验研究了光学系统不同  $F$  数下的激光干扰效果。测试了暗背景下、无激光干扰时 CCD 输出图像的噪声灰度和分布概率。通过比较光学系统不同  $F$  数下的激光干扰图像和灰度分布,发现各灰度级的像元数随  $F$  数的减小近似线性增加,而并非指数或者对数增加。最后基于夫琅禾费衍射理论,仿真了五边形光阑产生的衍射图样,仿真结果表明在  $F$  数较大时,激光干扰图像正是光阑的衍射图样。研究结果可为评估光电成像系统在不同  $F$  数下的激光干扰效果提供技术支持和理论参考。

**关键词** 成像系统;  $F$  数; 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/AOS201535.s211001

## Study of Laser Disturbing Effect Under Different $F$ Number of Optical System

Wang Yanbin Wang Guolang Chen Qianrong Wang Daoyou

Zhang Wenpan Ren Guangsen Zhu Rongzhen Li Hua

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

**Abstract** The laser disturbing effect under the different  $F$  number of optical system has been investigated in the experiment. We measure the noise grey value and its distribution probability of CCD output image under the dark background and no laser disturbing. According to comparing laser spot image and grey scale distribution under the different  $F$  numbers, it is found that the pixel number of different grey scales linearly increase with the gradually decrease of  $F$  number, not exponentially or logarithmically. At last, the diffraction pattern of pentagonal stop is effectively simulated based on the theory of Fraunhofer diffraction. The simulated results show that laser spot image is just the diffraction pattern of stop at the large  $F$  number. The research results can provide technical support and theoretical reference for evaluating laser disturbing effect of electro-optical imaging system under the different  $F$  numbers.

**Key words** imaging systems;  $F$  number; noise distribution; number of saturated pixel; laser disturbing effect

**OCIS codes** 110.2970;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<sup>[1-3]</sup>。典型的 CCD 光电成像系统主要由光学系统、CCD 芯片、驱动电路、信号处理电路、电子接口电路等组件构成。光学系统将目标/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,输出的电信号再经过信号处理电路进行采样保持、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由电子接口电路输出。

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

收稿日期: 2015-07-01; 收到修改稿日期: 2015-07-15

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

伤<sup>[4-6]</sup>。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实验现象(包括饱和、过饱和、串扰、硬破坏等等)<sup>[4-5,7]</sup>,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)<sup>[4,8-9]</sup>,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<sup>[10-11]</sup>。然而,由于光学系统不同光圈  $F$  数下背景杂散光(太阳光、灯光等等)对干扰效果的影响难以完全滤除,并且常见的 CCD 相机多是直接输出图像或者视频信号,即难以获得信号处理后探测器各像元对应的目标/背景精确灰度值,所以对于不同光学系统  $F$  数下激光干扰效果的深入研究并不多见。本文在严格消光的光学暗室内开展测试实验,采用可以输出探测器各像元对应灰度值的科研级 CCD 数字相机,研究了光学系统  $F$  数对激光干扰效果的影响以及不同  $F$  数下的激光干扰效果。

## 2 实验方案

图 1 是测试光学系统不同  $F$  数下激光干扰效果的实验布局图。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,它采用电光调 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 3 mrad,单脉冲能量 50 mJ,重复频率 10 Hz。衰减片组用于调节入射的激光功率。AZURE-3514MM 为实验将要采用光学系统的型号,实物如图 2 所示,该光学系统是由福州浩蓝光电有限公司生产,工作焦距是 35 mm;当配套的探测器光敏面为 1/3"时,系统全视场约为 7.85°;其光阑形状为正五边形,如表 1 所示,光圈  $F$  数可以分别设置为 1.4、2.0、2.8、4、5.6、8、11、16、22、32。由于该光学系统是定焦镜头,而相对孔径  $D/f=1/F$ ,所以表 1 中给出的是不同  $F$  数下的相对孔径、相对面积和相对面积比。可见,  $F$  数越大,通光的相对孔径越小,通光的相对面积越小;相邻  $F$  数之间的相对通光面积正好相差一倍。

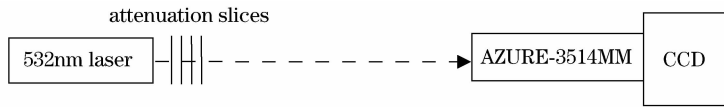


图 1 实验布局图

Fig. 1 Experimental layout



图 2 AZURE-3514MM 镜头

Fig. 2 AZURE-3514MM lens

表 1 光学系统不同  $F$  数的相对孔径与面积

Table 1 Relative aperture and area under different  $F$  number of optical system

$F$ number	1.4	2.0	2.8	4	5.6	8	11	16	22	32
Relative aperture $D/f$	1/1.4	1/2	1/2.8	1/4	1/5.6	1/8	1/11	1/16	1/22	1/32
Relative area $(D/f)^2$	0.51	0.25	0.13	0.063	0.032	0.016	0.008	0.004	0.002	0.001
Relative area radio $R$	512	256	128	64	32	16	8	4	2	1

实验中将要采用的光电探测器 CCD 是由北京联合赛仪科技有限公司代理生产的,型号为 DMK23G 445,采用 Sony ICX445ALA 芯片,具体参数为:光敏面对角线长度  $1/3''$ 、像元规模  $1280(H) \times 960(V)$ 、像元尺寸  $3.75 \mu\text{m}$ , CCD 放大电路的增益设置范围  $0\text{dB} \sim 30\text{dB}$ 。该 CCD 输出黑白图像,为获取探测器各像元产生的目标/背景电信号精确灰度值,直接采集信号处理电路输出的电信号,量化位数为 12 位,即像元灰度级范围  $1 \sim 4096$ 。为准确研究光学系统不同  $F$  数对激光干扰效果的影响,避免外界(太阳光、灯光等)杂散光的干扰,整个实验过程都在光学暗室中进行,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,即在暗背景(无任何杂光干扰)下进行实验。为便于比较,测试暗背景(无任何杂光干扰)、无激光干扰、放大电路增益  $0\text{dB}$  时该 CCD 输出的黑白图像、噪声灰度和灰度分布概率,分别如图 3(a)、(b)和(c)所示。由图 3(b)和(c)可知,各像元的灰度值均在 20 以下,不足饱和灰度值的 0.5%,说明确实没有外界杂光的影响,也说明大于 20 的灰度值才是有效信号;并且灰度值小于 2 的像元占到了 35%,灰度值大于 15 的像元不足 1%,表明该 CCD 输出图像的噪声灰度起伏非常小。需要说明的是,不同  $F$  数、暗背景下 CCD 输出图像的噪声灰度分布基本相同。

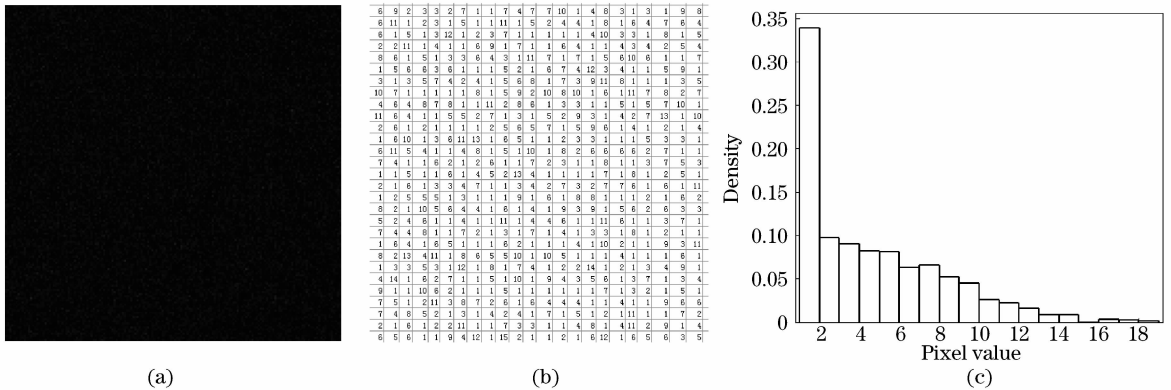


图 3 暗背景下 CCD(a)输出的图像、(b)噪声灰度和(c)分布概率

Fig. 3 (a) Output image, (b) noise grey value and (c) distribution probability of CCD under the dark background

### 3 不同 F 数下的激光干扰效果

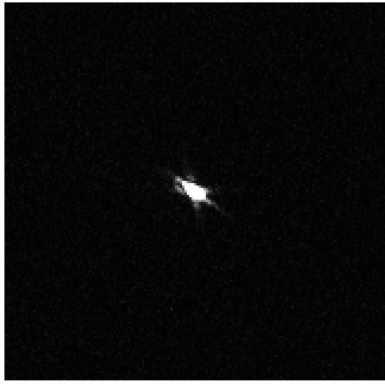
#### 3.1 实验现象与分析

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  $532 \text{ nm}$  的激光器对该 CCD 进行干扰实验。为避免激光损伤 CCD,干扰前将其输出能量衰减  $130 \text{ dB}$ ,输出功率约为  $5 \times 10^{-14} \text{ W}$ ,激光器与光学系统的作用距离为  $29.5 \text{ m}$ 。CCD 的放大电路增益设置为  $0 \text{ dB}$ (避免其信号处理电路的影响)、积分时间为  $40 \text{ ms}$ 。CCD 相机的光学系统通过调焦使其对工作距离大于  $0.5 \text{ m}$  的范围清晰成像,然后关闭所有光源,开始干扰实验。

图 4 显示了保持激光发射参数、探测器设置参数不变,逐级减小光学系统  $F$  数的激光干扰效果。图 4(a)  $F=32$  时,CCD 输出图像为带有 6 条光芒的激光光斑,像元最大灰度值为 1520;图 4(b)  $F=22$  时,CCD 输出图像中激光光斑有所增大,周围光芒变长,像元最大灰度值为 4093;图 4(c)  $F=16$  时,CCD 输出图像中激光光斑进一步增大,周围隐约可见 10 条光芒,有 14 个像元达到饱和,即达到了灰度级 4096;图 4(d)  $F=11$  时,光斑变化不大,有 16 个像元达到饱和;图 4(e)  $F=8$  时,光斑略有增大,有 14 个像元达到饱和;图 4(f)  $F=5.6$  时,有 22 个像元达到饱和;图 4(g)  $F=4.0$  时,激光光斑继续增大,有 43 个像元达到饱和;图 4(h)  $F=2.8$  时,激光光斑增大,淹没了周围的光芒,饱和像元数达到了 102 个。

为进一步统计分析不同  $F$  数下的激光干扰效果,图 5 做出了各灰度级下的像元数随  $F$  数的变化趋势。由表 1 可知, $F$  数的变化没有呈现出较强的规律性,但是不同  $F$  数之间的相对面积比  $R$ (表中定义  $F=32$  时的相对面积为基准,其他与之做比值)却是线性变化的,并且当激光器输出参数不变时,入射到光学系统处的激光能量分布不变,所以相对面积比就对应入射进光学系统的能量/功率比,因此,图 5 的横坐标为不同  $F$  数之间的相对面积比  $R$ ,图 5(a)、(b)、(c)、(d)中的纵坐标分别为  $N_1$ 、 $N_2$ 、 $N_3$  和  $N_4$ ,分别对应灰度值大于

20、100、1000 和饱和的像元数(灰度值为 4096),实验测量结果的统计值在图中用小圆圈标出。利用 Matlab 拟合工具对测量结果分别进行如下指数形式、线性、二阶多项式、对数形式拟合处理:



(a)

Table (b): A 15x15 grid of numerical data representing the intensity distribution of the star field in figure (a). The values range from 1 to 115, with the highest values concentrated in the center.

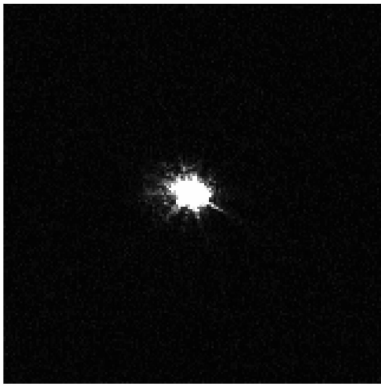
(b)



(c)

Table (d): A 15x15 grid of numerical data representing the intensity distribution of the star field in figure (c). The values range from 1 to 115, with a different spatial pattern compared to (b).

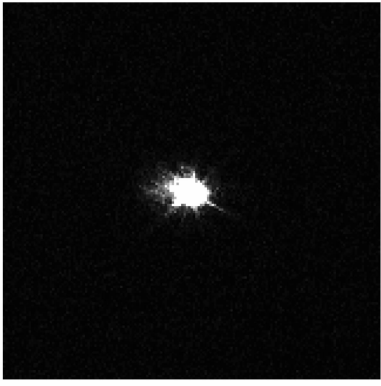
(d)



(e)

Table (f): A 15x15 grid of numerical data representing the intensity distribution of the star field in figure (e). The values range from 1 to 115, showing a more complex and dense distribution.

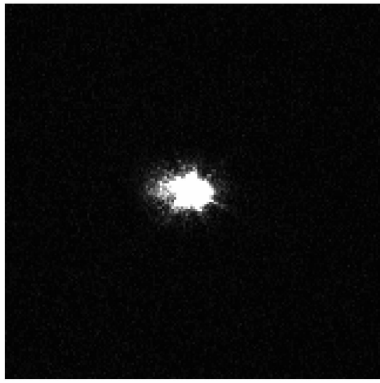
(f)



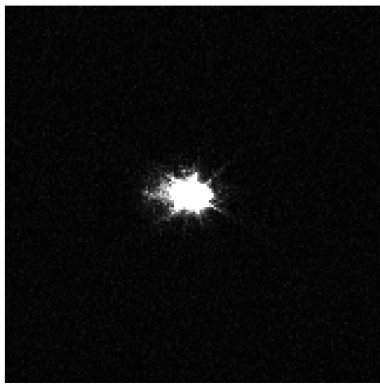
(g)

Table (h): A 15x15 grid of numerical data representing the intensity distribution of the star field in figure (g). The values range from 1 to 115, with a different spatial pattern.

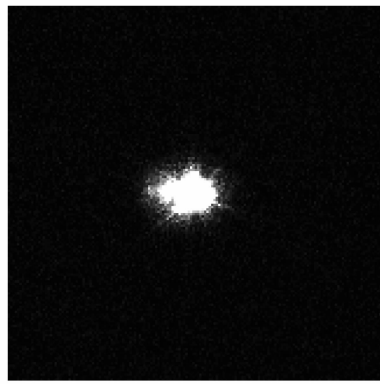
(h)



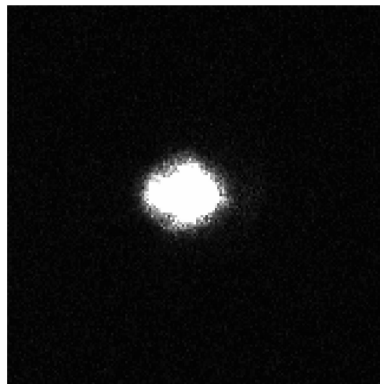
(i)



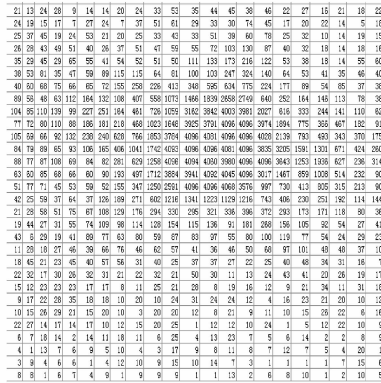
(k)



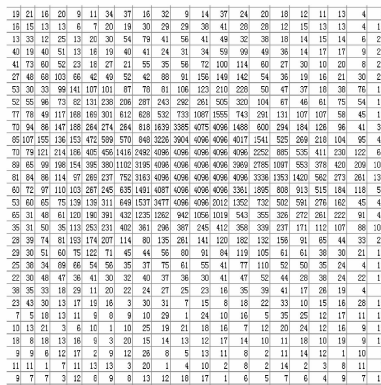
(m)



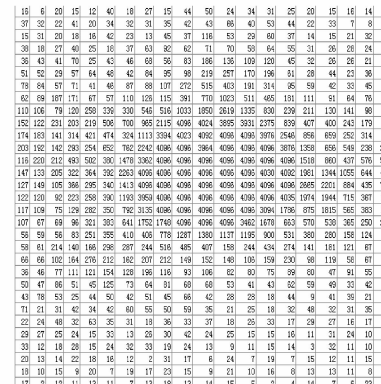
(o)



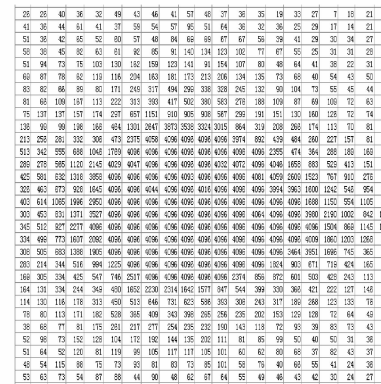
(j)



(l)



(n)



(p)

图 4 不同  $F$  数下的激光干扰效果。(a)  $F=32$ ; (b)  $F=22$ ; (c)  $F=16$ ; (d)  $F=11$ ; (e)  $F=8$ ; (f)  $F=5.6$ ; (g)  $F=4$ ; (h)  $F=2.8$

Fig. 4 Laser disturbing effect under different  $F$  number. (a)  $F=32$ ; (b)  $F=22$ ; (c)  $F=16$ ; (d)  $F=11$ ; (e)  $F=8$ ; (f)  $F=5.6$ ; (g)  $F=4$ ; (h)  $F=2.8$

$$N = a \exp(-b \cdot R) + c, \tag{1}$$

$$N = a \cdot R + b, \tag{2}$$

$$N = a \cdot R^2 + b, \tag{3}$$

$$N = a \cdot \log(R) + b, \tag{4}$$

发现,各种拟合中线性拟合的确定系数最接近 1,所以线性的拟合效果最好,因此,各灰度级的像元数随  $F$  数的逐级减小是线性增加的,而不是指数或者对数形式增加。图 5(a)对应的拟合系数是  $a=8.27$  和  $b=5233$ ;图 5(b)对应的拟合系数是  $a=3.43$  和  $b=98$ ;图 5(c)对应的拟合系数是  $a=1.23$  和  $b=23.4$ ;图 5(d)对应的拟合系数是  $a=0.7432$  和  $b=2.686$ 。

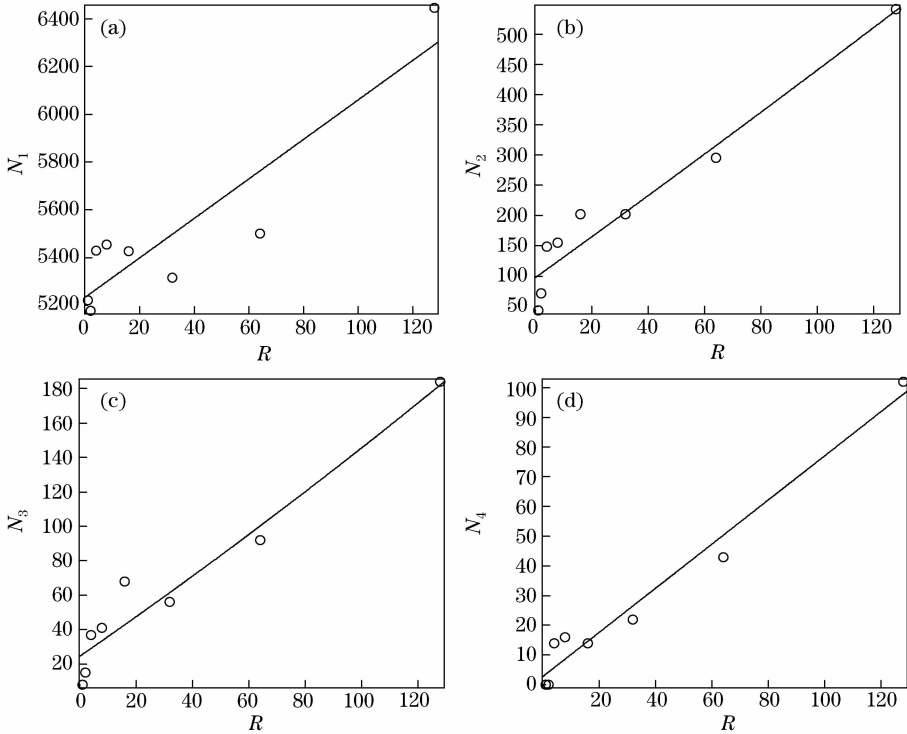


图 5 各灰度级像元数随  $F$  数的变化趋势。(a)  $N_1 > 20$ ; (b)  $N_2 > 100$ ; (c)  $N_3 > 1000$ ; (d)  $N_4 = 4096$

Fig. 5 Variable trend of pixel number with  $F$  number. (a)  $N_1 > 20$ ; (b)  $N_2 > 100$ ; (c)  $N_3 > 1000$ ; (d)  $N_4 = 4096$

### 3.2 五边形光阑衍射效应的仿真

目前较为成熟的夫琅禾费衍射理论,只能给出典型孔径(比如圆形、矩形孔径)产生的衍射图样,而对于五边形等特殊形状的衍射图样却没有给出。为了研究光学系统 AZURE-3514MM 五边形光阑产生的衍射图样,基于夫琅禾费衍射理论研究典型孔径产生衍射图样的思路,即首先给出孔径的透射率函数,然后对其进行傅里叶变换,最后取模平方得到衍射图样;同时借助 Matlab 软件进行仿真研究。

如图 6 所示,做出五边形光阑的图样,如图 6(a)所示,利用 Matlab 软件读图得到其对应的振幅透射率分布函数,调用 Matlab 软件自带函数 FFT 对其进行快速傅里叶变换,取模的平方,得到五边形光阑产生的衍射图样,如图 6(b)所示,在中心光斑周围清晰地分布着 10 条光芒,与图 4(d)、(e)、(f)周围分布的 10 条光芒相似。可见,在  $F$  数较大、光阑通光孔径较小时,探测器上的激光光斑就是光阑的衍射图样。图 4(a)和(b)由于入射进光学系统的激光能量较弱,10 条光芒没有完全显现出来,清楚可见地只有其中的 6 条。图 4(h)由于此时  $F=2.8$ ,光阑形状由五边形增大为近似圆形,五边形光阑的衍射效应不明显,所以周围发散的光芒消失。

## 4 结 论

通过比较不同  $F$  数下 CCD 的输出激光光斑图像,统计不同灰度级下的像元数,分析研究了光学系统不同  $F$  数下的激光干扰效果。采用 Matlab 拟合工具分别对实验测量结果进行指数形式、线性、二阶多项式、

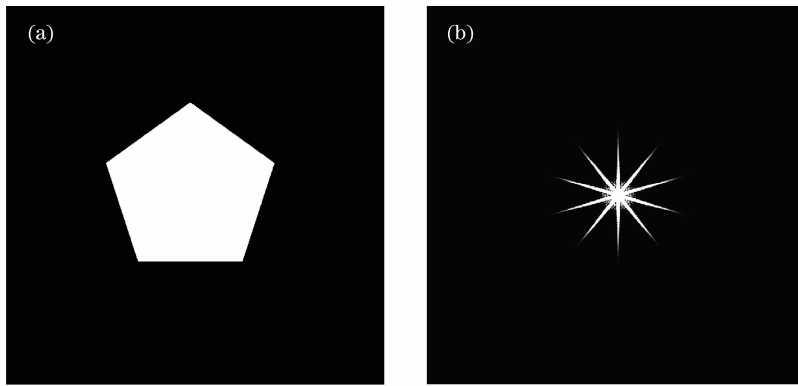


图 6 五边形光阑产生的衍射图样。(a)原始图样；(b)变换后图样

Fig. 6 Diffraction pattern generated by pentagonal stop. (a)Original pattern; (b)pattern after transforming

对数形式拟合处理,发现各灰度级像元数随  $F$  数的逐渐减小而线性增大。基于夫琅禾费衍射理论,仿真研究了光学系统五边形光阑产生的衍射图样,结果表明在  $F$  数较大、光阑通光孔径较小时,探测器上的激光光斑就是光阑的衍射图样。研究结果可为评估光电成像系统在不同  $F$  数下的激光干扰效果提供技术支撑和有益参考。

### 参 考 文 献

- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Liu Changan, 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.
- 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.
- 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.
- Zhang C Z, Blarre L D, Walser R M, et al. Mechanisms for laser-induced functional damage to silicon charge-coupled imaging sensors[J]. Appl Opt, 1993,32(27):5201-5210.

栏目编辑: 韩峰