

激光干扰 CCD 规则亮点分布原理研究

陈前荣^{1,2}, 亓凤杰^{1,2}, 王彦斌^{1,2}, 张文攀^{1,2}, 李 华^{1,2}

(1. 光电对抗测试评估技术重点实验室, 河南 洛阳 471003;

2. 中国洛阳电子装备试验中心, 河南 洛阳 471003)

摘 要: 激光干扰 CCD 时光的传输过程的研究, 对激光干扰 CCD 干扰图像的仿真、干扰效果的分析等具有重要意义。理论分析了考虑探测器表面反射时的激光干扰 CCD 时光的传输过程。由于透镜的作用, 首先激光会聚焦到探测器表面。聚焦光会被探测器表面反射。由于 CCD 探测面是网格状分布, 反射光的分布会被这一结构调制。反射后的光经过透镜, 会成像在某些平面上。根据透镜中光的传输计算发现, 因为透镜的傅里叶变换作用, 光阑平面上会出现周期性的亮点分布。由于光阑平面上不透光的部分的反射, 亮点会再次成像在探测器表面上。仿真了亮点被光阑平面上不透光部分的反射后, 经过光阑后面的透镜又成像在探测器上的过程, 得到了规则的周期性的亮点分布。实验结果验证了这一理论。

关键词: 激光干扰; CCD; 光传输; 规则亮点

中图分类号: TN24 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.1106007

Distribution theory study of CCD regular periodical spots jammed by laser

Chen Qianrong^{1,2}, Qi Fengjie^{1,2}, Wang Yanbin^{1,2}, Zhang Wenpan^{1,2}, Li Hua^{1,2}

(1. Key Laboratory of Electro-Optical Countermeasures Test & Evaluation Technology, Luoyang 471003, China;

2. Luoyang Electronic Equipment Test Center of China, Luoyang 471003, China)

Abstract: When CCD was jammed by laser, the study of laser transmission was one of the most important parts for the jamming image simulation and jamming effect evaluation. The transmission of laser considering the reflection of the detection plane was studied. First, laser was focused by the lens. Because the detection plane of CCD was gridding-like structure, the focused laser reflected by the plane was modulated. According to the calculation of the laser transmission through the lens, the periodical spots appeared on the aperture plane. The simulation of the transmission proved that after the spots were reflected by the aperture plane, periodical spots image appeared on the detection plane. The experimental result was in accordance with the theory.

Key words: laser jamming; CCD; laser transmission; regular periodical spots

收稿日期: 2016-03-07; 修订日期: 2016-04-10

基金项目: 国家自然科学基金(11504420)

作者简介: 陈前荣(1972-), 男, 研究员, 主要从事光电对抗方面的研究。Email: chen_qianrong@126.com

0 引言

电荷耦合器件(CCD)是目前最具代表性的固体成像器件之一。由于 CCD 探测器具有体积小、灵敏度高和动态范围大等特点,已经广泛用于工业、军事和科学研究等领域。然而,由于其高灵敏度等特点,以 CCD 为核心的器件易受到激光的干扰而不能正常工作。激光对 CCD 的辐照效应已经被广泛深入地研究^[1-9]。研究包括不同激光参数(如视场^[1]、波长^[2]、脉宽^[3]、能量^[4]和频率^[5]等)下激光对 CCD 的干扰;一些特殊实验现象(如串扰、过饱和效应、主光斑丢失现象等)出现的原因分析^[6]等。在激光干扰 CCD 时在 CCD 光学系统中的传输方面,已有的研究包括通过 PSF 函数分析聚焦到 CCD 表面的光斑分布^[7],分析衍射等效效应研究出现的光芒^[8]、大面积圆环现象^[9]等。然而,这些研究都没有考虑聚焦到 CCD 探测器表面的光被表面反射以及其后的传输效应。

文中分析了激光在 CCD 探测面上的反射以及此后经过光学系统传输的过程,发现探测面上会出现规则亮点分布,且实验现象和理论分布规律符合很好。得到结论:由于 CCD 探测器表面是周期性的光栅结构分布,激光聚焦到 CCD 探测器上反射回去的光经过透镜成像,会在光阑平面上形成规律性的光点分布。光阑面上出现的规则亮点被光阑平面反射后,经过光学系统成像到探测器表面上,从而得到规则亮点分布图像。这一分布对增大激光干扰面积、加强干扰效果具有重要的对抗意义。

1 原理分析

激光聚焦到 CCD 探测器上,会被探测器表面反射,由于探测器表面是周期性的光栅结构分布,反射回去的光经过透镜成像,会在光阑平面上形成规律性的光点分布。这一分布经过光阑表面反射,经过透镜成像到 CCD 探测面上,形成周期性的规则亮点分布。具体推导过程如下。

1.1 光阑表面成像分析

1.1.1 理论推导

CCD 探测面是一个规律性的矩形光栅,经过其反射后的光经过透镜成像,会在光阑平面上生成规律性的光点分布。

设这一光点分布在距离主透镜(焦距为 f)前 d_1 的平面上,设其分布为 $w(x, y)$ 。设五边形光阑的透过率函数为 $t(x_1, y_1)$,其傅里叶变换为 $T(\varepsilon, \eta)$,在距离主透镜前 d_0 的平面上,则满足下式^[10]:

$$F\{w(x, y)\} \exp\left[\frac{jk}{2f}\left(1-\frac{d_1}{f}\right)(x_1^2+y_1^2)\right] = \exp\left[\frac{jk}{2f}\left(1-\frac{d_0}{f}\right)(x_1^2+y_1^2)\right] T(\varepsilon, \eta) R(\varepsilon, \eta) \quad (1)$$

式中: $R(\varepsilon, \eta)$ 为 CCD 探测面的反射函数; $k=2\pi/\lambda$ 为波数; $F\{\}$ 表示傅里叶变换。当 $d_1=d_0$ 时,可做如下求解求 $w(x, y)$ 。

CCD 探测面是一个规律性的矩形光栅,设其透过率函数为:

$$R = \text{rect}\left(\frac{x_1}{b_x}\right) \frac{1}{d_x} \text{comb}\left(\frac{x_1}{d_x}\right) \text{rect}\left(\frac{y_1}{b_y}\right) \frac{1}{d_y} \text{comb}\left(\frac{y_1}{d_y}\right) \quad (2)$$

式中: b_x 为光栅 x 方向上每个狭缝的宽度; b_y 为 y 方向上每个狭缝的宽度; d_x 为光栅 x 方向上相邻狭缝的中心间距; d_y 为光栅 y 方向上相邻狭缝的中心间距,则:

$$TR = T(\varepsilon, \eta) \text{rect}\left(\frac{\lambda f \varepsilon}{2\pi b_x}\right) \frac{1}{d_x} \text{comb}\left(\frac{\lambda f \varepsilon}{2\pi d_x}\right) \times \text{rect}\left(\frac{\lambda f \eta}{2\pi b_y}\right) \frac{1}{d_y} \text{comb}\left(\frac{\lambda f \eta}{2\pi d_y}\right) \quad (3)$$

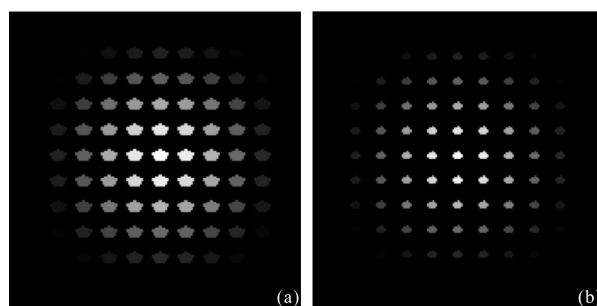
则:

$$w(x, y) = F^{-1}\{TR\} = t(x, y) \left[\frac{\sin\left(\frac{x}{2\lambda f/b_x}\right)}{x} \times \sum_{m=-m_0}^{+m_0} \delta\left(x-m\frac{\lambda f}{d_x}\right) \right] \left[\frac{\sin\left(\frac{y}{2\lambda f/b_y}\right)}{y} \times \sum_{n=-n_0}^{+n_0} \delta\left(y-n\frac{\lambda f}{d_y}\right) \right] \quad (4)$$

式中: $\delta(\cdot)$ 为 δ 函数。

1.1.2 光阑平面上的光强分布

取 $w(x, y)$ 模的平方,得到不同 F 数下光阑上的光强分布如图 1 所示。图 1(a)~(d) 依次为 $F=2.8, 4, 8, 16$ 时的分布。由图 1 中可以看到,所有光点的轮廓分布类似八边形。每个点呈类似光阑的正五边形



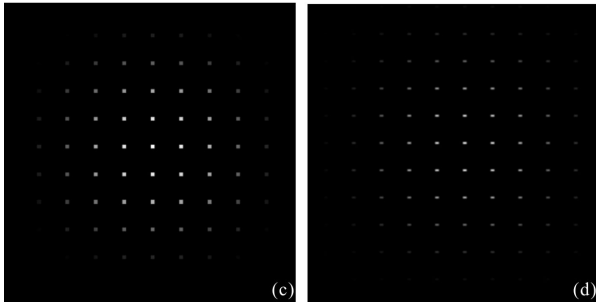


图 1 不同 F 数下光阑平面上点的分布仿真结果

Fig.1 Simulation result of the spots distribution of different F number on the aperture plane

分布,每个点的振幅由中心向外逐渐减小。随着 F 数的增大,每个光点的尺寸会减小,但是光点之间的间距保持不变。

1.2 光阑上的点成像到 CCD 探测面上的计算

如图 2 所示,光阑平面上的点经过光阑面的反射后,经过后面的透镜成像到探测面上。设透镜的焦距为 f_1 ,光阑距离透镜 z_1 ,透镜距离探测面 z_2 ,则求解探测面上的振幅分布可用如下方程^[10]:

$$U(x_1, y_1) = \exp\left[j\frac{\pi}{\lambda z_2}(x_1^2 + y_1^2)\right] \iint w(x, y) r \times \exp\left\{j\frac{\pi}{\lambda}\left(\frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2} - \frac{1}{f_1}\right)(u^2 + v^2) + \frac{1}{z_1}(x^2 + y^2)\right\} \times \exp\left\{-j\frac{\pi}{\lambda}\left(\frac{x}{z_1} + \frac{x_1}{z_2}\right)u + \left(\frac{y}{z_1} + \frac{y_1}{z_2}\right)v\right\} dx dy du dv \quad (5)$$

式中:光阑平面为 (x, y) ;透镜平面为 (u, v) ;探测器平面为 (x_1, y_1) ; r 为光阑平面的反射率。

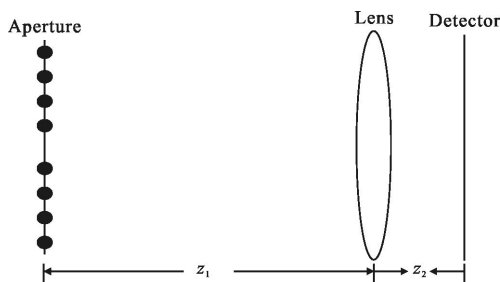


图 2 各部分分布示意图

Fig.2 Schematic of the distribution structure

为了方便起见,只计算 $F=16$ 的情况,即光点比较小的时候,此时每个光点可写作脉冲函数。每个脉冲函数(每个点)在探测器表面上的分布 $U(x_1, y_1)$ 可化简为:

$$U(x_1, y_1) = \frac{\sin[x_1 d_x / (2\lambda f)]}{x_1 d_x / (\lambda f)} \frac{\sin[y_1 d_y / (2\lambda f)]}{y_1 d_y / (\lambda f)} \exp\left[j\frac{\pi}{\lambda}\frac{1}{z_1}x_1^2\right] \exp\left[j\frac{\pi}{\lambda}\frac{1}{z_1}y_1^2\right] \iint \exp[-j\pi a u^2] \exp\left\{-j2\pi\left[\frac{1}{\lambda}\left(\frac{x_1}{z_1} + \frac{x_2}{z_2}\right)u\right]\right\} du \exp[-j\pi a v^2] \exp\left\{-j2\pi\left[\frac{1}{\lambda}\left(\frac{y_1}{z_1} + \frac{y_2}{z_2}\right)v\right]\right\} dv \quad (6)$$

式中: $a = -\frac{1}{\lambda}\left(\frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2} - \frac{1}{f_1}\right)$ 。可以得到 $U(x_1, y_1)$ 的模的平方正比于下式:

$$|U(x_1, y_1)|^2 \propto \left\{\frac{\sin[x_1 d_x / (2\lambda f)]}{x_1 d_x / (\lambda f)}\right\}^2 \left\{\frac{\sin[y_1 d_y / (2\lambda f)]}{y_1 d_y / (\lambda f)}\right\}^2 \times F^2 \left\{ \exp\left(-j\pi\frac{a}{b^2}u^2\right) \exp\left(-j\frac{\omega_0}{b}u\right) \times \exp\left(-j\pi\frac{a}{b^2}v^2\right) \exp\left(-j\frac{\omega_0}{b}v\right) \right\} \times 4\text{sinc}^2(x_1 d_x / (2\lambda f)) \text{sinc}^2(y_1 d_y / (2\lambda f)) \times F^2 \left\{ \exp\left(-j\pi\frac{a}{b^2}u^2\right) \exp\left(-j\frac{\omega_0}{b}u\right) \times \exp\left(-j\pi\frac{a}{b^2}v^2\right) \exp\left(-j\frac{\omega_0}{b}v\right) \right\} \quad (7)$$

式中: $\omega_0 = \frac{z_2}{z_1} m \frac{\lambda f}{d_x}$; $b = \frac{1}{\lambda z_2}$ 。作傅里叶变换可以发现,每个点对应的像面上的点占一个像素。根据图 1(d)里得到的 $F=16$ 时的仿真图可知,点点之间的间距和点的大小之间的比例在 15 左右。所以,点点之间的间距为 10 个像素的量级,点的强度为 sinc 函数变化趋势。根据这一点,可以仿真得到探测面上的光点分布如图 3 所示。

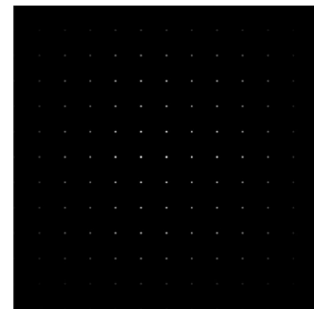


图 3 探测器接收平面上的点的分布仿真结果

Fig.3 Simulation result of the spots distribution on the detector plane

2 实验方案及结果

图 4 是开展激光辐照 CCD 的实验布局图。图中 Laser 是实验采用的波长为 1 064 nm 的 Nd:YAG 激

光器,由北京镭宝激光技术有限公司生产,采用电光调 Q 方式输出纳秒量级的脉冲激光。详细发射参数包括:光束发散角为 0.5 mrad,单脉冲能量 180 mJ,脉冲重复频率可分别设置为 10、50、100 Hz。Attenuator 是适用于 1 064 nm 波长激光的衰减片,其主要作用有:第一,有效调节入射 CCD 的激光能量;第二,在光路中添加以避免 CCD 被强激光照射而损伤。图中 CCD 是光敏面 1/3"的可输出黑白数字图像的可见光面阵 CCD,由北京联合赛仪科技有限公司代理生产,型号为 M23G445,采用索尼公司的感光元件 ICX445AQA;其他参数包括:像素数 960(水平)×1280(垂直),像元大小 3.75 μm,最低照度为 0.05 lx,输出灰度值范围 1~4 096。图中 3514 MM 是与 CCD 配套使用的工业镜头的型号,镜头也可称为 CCD 的前置光学系统,其作用是将某一视场内的景物成像在 CCD 的光敏面上,3514 MM 的全视场约为 7.85°,光圈 F 数可调,图中虚线是激光束的传输方向,激光器与 CCD 的作用距离 L 为 29.5 m,实验中将前置光学系统 3514 MM 和 CCD 放在高度可调的升降架上,便于将 CCD 调节至与激光器同高,以实现激光束正直入射前置光学系统 3514 MM 和 CCD。



图 4 实验布局图

Fig. 4 Experimental setup

实验中得到 F 数为 2.8, 4, 8, 16(激光功率为 1.8 μW。CCD 的增益为 0 dB,积分时间为 40 ms)时的光强分布如图 5 所示。其中,图 5(a)~(d)依次为 $F=2.8, 4, 8, 16$ 时的分布。

由图 5 中可以看到,亮点对称的分布在主光斑周围。亮点的整体轮廓是类似八边形分布。光阑增大时,亮点的尺寸会增大,并且由点状分布变为类似光

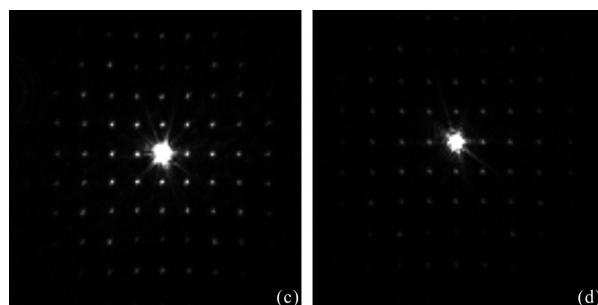
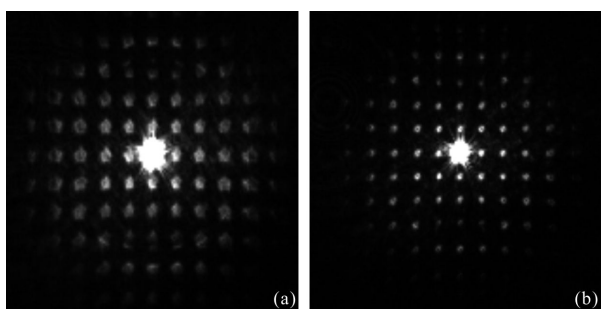


图 5 探测器平面上的点的分布实验结果

Fig.5 Experimental result of the spots distribution on the detector plane

阑的五边形分布。但亮点之间的间距不随光阑的变化而变化。这一分布和仿真结果符合很好。由 $F=16$ 时仿真得到点点间距为 15 个像素,和实验中得到的 20 个像素左右可比。

4 结 论

通过研究激光干扰 CCD 时探测器表面反射时的传输过程,分析了激光干扰 CCD 时出现的规则周期性亮点分布出现的原理。由于 CCD 探测面是网格状分布,经过其表面反射的光会被网格状分布调制,从而在光阑平面上得到周期性分布的亮点。由于光阑平面对规则亮点的反射,光经过光学系统传输到达探测面上会得到规则亮点分布。仿真了这一过程,实验结果和仿真结果可比。这一研究考虑了探测器表面的反射对干扰效果造成的影响,得到了除衍射等现象外出现的新的激光能量分布,对激光能量较强时干扰现象的分析具有重要意义。周期性规则亮点的分布对加强激光干扰效果具有重要作用,尤其是在激光能量较强时每个亮点还会出现串扰等干扰现象,对进一步加大干扰面积、增强干扰效果具有重要意义。

参考文献:

[1] Li Haiyan, Zhu Min, Lu Hongyi. Off-axis laser disturbing CCD imaging guidance weapons [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(1): 66-69. (in Chinese)
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.

[2] 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. (in Chinese)
- 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.
- [3] Cai Yue, Ye Xisheng, Ma Zhiliang, et al. Experiment of 170 ps laser pulse irradiation effect on visible plane array Si-CCD [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(2): 457–462. (in Chinese)
- 蔡跃, 叶锡生, 马志亮, 等. 170 ps 激光脉冲辐照可见光面阵 Si-CCD 的实验[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(2): 457–462.
- [4] Zhang Qiang, Wang Yuefeng, Han Yudong, et al. Simulation of mixture frequency laser irradiation on CCD detector [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2010, 31(5): 787–792. (in Chinese)
- 张强, 汪岳峰, 韩玉东, 等. 混合频率激光干扰 CCD 探测器的仿真研究[J]. *半导体光电*, 2010, 31(5): 787–792.
- [5] Ni Xiaowu, Lu Jian, He Anzhi. Study of hard-destructive mechanism of the charge-coupled devices by a laser [J]. *Acta Physica Sinica*, 1994, 43(11): 1795–1802. (in Chinese)
- 倪晓武, 陆建, 贺安之. 激光对电荷耦合器件硬破坏机理研究[J]. *物理学报*, 1994, 43(11): 1795–1802.
- [6] Zhang Zhen. Laser-induced dazzling phenomena in visible light CCD and their mechanism [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010. (in Chinese)
- 张震. 可见光 CCD 的激光辐照效应实验研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010.
- [7] Xu Xin, Sun Xiaoquan, Shao Li, Simulation of laser jamming and its influence on CCD imaging performance [C]//SPIE, 2010, 7850: 7850w.
- [8] Jiang Tian, Cheng Xiang'ai. Study on regular distribution of bright points with 3CCD irradiated by laser [J]. *Laser Technology*, 2010, 34(2): 168–171. (in Chinese)
- 江天, 程湘爱. 激光辐照 3CCD 规则分布亮点研究 [J]. *激光技术*, 2010, 34(2): 168–171.
- [9] Wang Yanbin, Qi Fengjie, Li Hua, et al. Diffraction effect of entrance pupil by irradiating visible light array CCD with pulsed laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26(1): 011009. (in Chinese)
- 王彦斌, 齐凤杰, 李华, 等. 脉冲激光辐照可见光面阵 CCD 的入瞳衍射效应 [J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26(1): 011009.
- [10] Ji Jiangrong. *Advanced Optics Course* [M]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese)
- 季家镛. *高等光学教程* [M]. 北京: 科学出版社, 2007.