

文章编号: 1001-3806(2014)05-0619-04

## 脉冲激光干扰面阵 CCD 成像系统的实验研究

张超<sup>1</sup>, 王滨<sup>2</sup>, 廖志焯<sup>2</sup>, 衣学斌<sup>2</sup>, 万勇<sup>2</sup>, 张伟<sup>2</sup>

(1. 中国人民解放军总参谋部四部驻成都地区军代室, 成都 610036; 2. 西南技术物理研究所, 成都 610041)

**摘要:** 为了研究脉冲激光对面阵 CCD 的干扰效果, 采用近场模拟实验的方法, 设计了重复频率脉冲激光干扰 CCD 成像器件近场实验。当 CCD 器件表面接收激光功率密度达到  $2.97\text{mJ}/\text{cm}^2$  时, 观察和记录了 CCD 器件串音饱和现象; 当 CCD 摄像机电子快门打开时, 除发射窗口有激光光斑图像外, 激光脉冲在激光器出光口垂直方向也会形成偏离出光口位置的漂移光斑图像。分析了 CCD 摄像机电子快门作用机理及图像信号转移方式机理, 并对光斑漂移现象给出了合理解释。结果表明, 重复频率脉冲激光可使 CCD 图像上出现漂移光斑而对图像形成干扰。这为重频脉冲激光干扰 CCD 的研究提供了理论基础和初步实验验证。

**关键词:** 激光技术; 脉冲激光; CCD 成像系统; 激光干扰; 漂移光斑

**中图分类号:** TN249 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2014.05.009

### Experimental study on disturbing effect of pulsed laser against array CCD imaging systems

ZHANG Chao<sup>1</sup>, WANG Bin<sup>2</sup>, LIAO Zhiye<sup>2</sup>, YI Xuebin<sup>2</sup>, WAN Yong<sup>2</sup>, ZHANG Wei<sup>2</sup>

(1. Military Representative Office in Chengdu, Fourth Department of the Headquarters of the General Staff, Chinese People's Liberation Army, Chengdu 610036, China; 2. Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** In order to study the disturbing effect of pulsed laser against an array CCD, experiment of CCD imaging system disturbed by repeated pulse laser was carried out at short-distance. Crosstalk effect of the CCD was observed and recorded at an energy density of  $2.97\text{mJ}/\text{cm}^2$  received by the CCD detector. When the electric shutter of the CCD vidicon was turned on, the images of excursion laser spots were found in the vertical direction of the laser radiation windows except for laser beam spot image. Operation principle of the electric shutter and the transfer mechanism of the CCD were analyzed. Phenomena of laser spot excursion were explained. Experimental results indicate that CCD images can be disturbed by the spot excursion caused by repeated pulse laser. The result lays the academic foundation and elementary experiment for CCD disturbed by repeated pulsed laser.

**Key words:** laser technique; pulsed laser; CCD imaging system; laser disturbing; beam spot excursion

## 引 言

基于可见光 CCD 面阵器件的光学成像系统在光电跟踪、瞄准、图像制导等领域有广泛的应用。采用连续波、准连续激光对 CCD 成像系统实施主动干扰已有广泛研究<sup>[1-4]</sup>, 根据作战使用需要, 若要在更远距离达到图像干扰效果, 对激光输出功率应有较高的要求。在相同的抽运能量注入条件下, 采用重复频率调 Q 脉冲方式运转, 可以获得更高的峰值功

率脉冲激光输出<sup>[5]</sup>, 峰值功率的提升有利于提升激光干扰作用距离, 获得更佳的干扰效果, 甚至可以造成光学探测器件的硬损伤<sup>[6-8]</sup>。相比于背景光源, 脉冲激光具有峰值功率很高和脉冲作用时间极短等特点, 因而视场内, 脉冲激光照射极易使 CCD 器件达到光电饱和状态, 进而造成成像器件失效, 但是, 若不考虑硬件损伤, 只考虑软杀伤压制干扰, 激光脉冲重复频率的降低, 会降低 CCD 成像器件对激光脉冲的捕获概率, 从而影响实际干扰效果。作者通过近场模拟实验, 验证了脉冲激光对 CCD 成像系统的主动干扰。

## 1 实验装置

图 1 是激光对 CCD 成像系统干扰实验装置示

作者简介: 张超(1976-), 男, 工程师, 研究方向为电子对抗及主动干扰。

E-mail: 289038404@qq.com

收稿日期: 2013-10-15; 收到修改稿日期: 2013-10-25

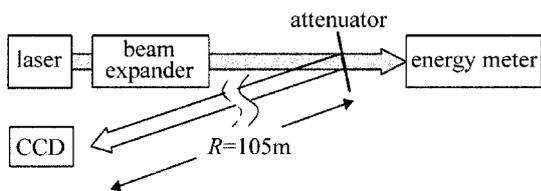


Fig. 1 Experiment of laser irradiating CCD

意图。实验中所选用激光器为电光调 Q 的 Nd:YAG 激光器,输出波长  $\lambda = 1064\text{nm}$ ,脉宽 10ns,重复频率 1Hz ~ 100Hz 可调,光束发散角  $\theta = 5\text{mrad}$ ,为了模拟远距离激光干扰,选择激光单脉冲能量  $E_0 = 10\text{mJ}$ ,激光束经反射式分光衰减片衰减系数  $\tau_R = 5\%$  (通过距离  $R$  后的参量),CCD 成像系统放置于距离  $R = 105\text{m}$  以外,则投射到成像系统的激光能量为:

$$E_r = 4E_0\tau_c\tau_R A_c / [\pi(R\theta)^2 e^{\alpha R}] \quad (1)$$

式中,  $\alpha$  是大气衰减系数,近距离实验可忽略,  $\tau_c$  是成像系统的光学传输系数,  $A_c$  是成像系统的光学接收口径的面积。

作为光电观瞄、图像制导等领域的应用,需要 CCD 电耦合器件输出连续视频信号。电耦合器件的功能是把 2 维光学图像信号转换为 1 维视频信号输出。光学成像系统将景物图像成像在 CCD 光敏面上,在每一个光敏单元势阱中存放与图像照度成正比的光生信号电荷,完成光电转换和电荷的积累,然后将电荷转移到 CCD 的移位寄存器中,在驱动脉冲的作用下顺序地移出寄存器,形成视频信号。实验中成像器件选用黑白面阵式 CCD,单单元尺寸  $8.6\mu\text{m} \times 8.3\mu\text{m}$ ,CCD 电子快门时间为  $10\mu\text{s} \sim 20\text{ms}$ ,视频帧频为 25Hz,场频 50Hz。CCD 成像系统选用一组焦距  $f = 75\text{mm}$  镜头,通光孔径  $D = 4.7\text{mm}$ 。可以计算出在 CCD 焦平面上的光斑的光能量密度为:

$$I = E_r D^2 / [\pi(1.22\lambda f)^2] \quad (2)$$

带入相关参量计算,得到  $E_r = 4.0 \times 10^{-8}\text{J}$ ,  $I = 2.97 \times 10^{-3}\text{J}/\text{cm}^2$ ,该能量阈值高于 CCD 器件饱和和串音阈值,但低于 CCD 器件的硬损伤阈值约 1 ~ 2 个数量级<sup>[9]</sup>。考虑光束发散及大气衰减的影响,该能量密度参量可以模拟 5km 以外、1J 量级单脉冲能量激光对 CCD 成像系统的干扰效果。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 电子快门关闭

关闭 CCD 成像器件电子快门,CCD 摄像机默认的单帧图像曝光时间为 1/50s。正常的视频图像信

号如图 2a 所示。当照射激光器重复频率不小于 50Hz 时,则成像器件每一帧图像都能够捕获到激光光斑。图 2b 所示是有激光照射时 CCD 成像器件图像,除激光发射窗口处激光耀斑外,在屏幕垂直方向有一条串扰图像带。

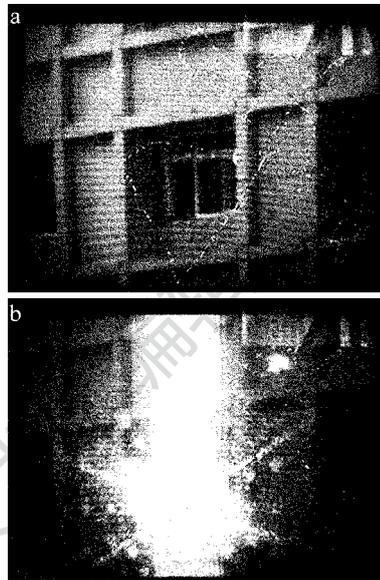


Fig. 2 Laser disturbing images when the electric shutter of the CCD was turned off

a—image of no disturb b—disturbing image

形成饱和串音的机理已得到广泛的研究和分析。光斑辐照区内的像素在积分前期即达饱和,后续产生的光生载流子从这些饱和像素中溢出,流向两侧的未饱和或空阱状态的像素,当两侧相邻的像素点达到饱和后,载流子继续流向两侧距离更远的像素点,于是两侧未被光照的像素势阱内也存在电荷点信号,这些获得信号的像素组成了视频图像中的串扰带<sup>[10]</sup>。

### 2.2 电子快门打开

电子快门打开时,CCD 电子快门时间在  $10\mu\text{s} \sim 20\text{ms}$  范围,实验中激光脉冲宽度在纳秒量级,远低于单场图像曝光时间,若激光脉冲落入 CCD 器件电子快门之外,光斑图像应不被成像捕获。背景目标亮度增强会导致 CCD 器件电子快门时间缩短,激光光斑被电子快门捕获几率变小,在晴朗天气昼间室外自然光照明背景亮度下,通过改变激光重复频率实现调整脉冲间隔时间,验证摄像器件成像对激光脉冲光斑的捕获。

实验中记录了激光器以重复频率 30Hz, 60Hz, 95Hz 和 99Hz 工作时的 CCD 图像干扰视频,图 3 所示是不同重复频率脉冲激光照射时 CCD 成像器件

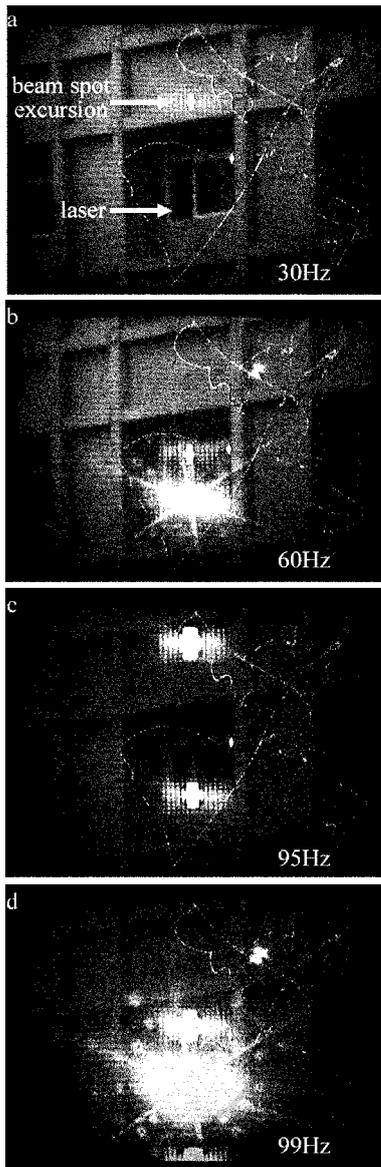


Fig. 3 Laser disturbing images when the electric shutter of the CCD was turned on

单帧局部图像,30Hz 和 95Hz 截取的是未捕获到激光光斑的帧图像,60Hz 和 99Hz 截取的是捕获到激光光斑的帧图像。除激光发射窗口光斑图像外,可以看到在竖直方向上偏离出光口的位置存在激光漂移光斑,在摄像视频中耀斑的位置随帧频移动。图 4 所示为连续 20 帧图像中激光光斑出现的位置,坐标轴横轴表示视频帧,纵轴表示激光光斑的水平位置,根据图像信号分辨率将图像竖直方向划分为 576 行,取图像底部为第 0 行,图像顶部为第 576 行,激光器位于图像中第 150 行位置。

随着激光重复频率的提高,激光出光口光斑捕获概率增高,漂移光斑出现的频率增高,入射激光重复频率为 30Hz 时,部分帧图像中出现 1 个漂移光

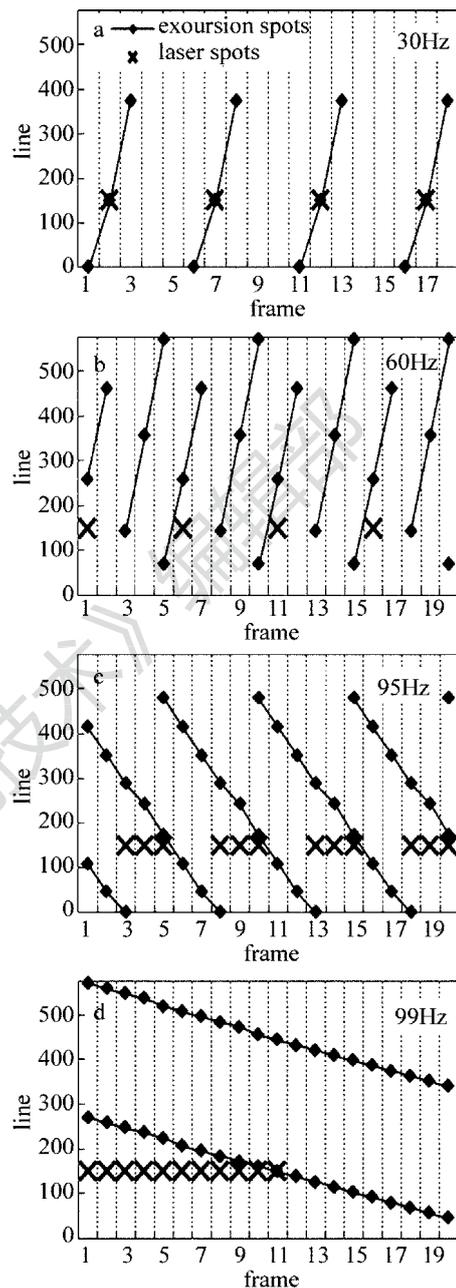


Fig. 4 Vertical position of the excursion laser spots

斑,重复频率为 60Hz 时,每帧图像中都出现漂移光斑,部分图像中出现 2 个漂移光斑,重复频率为 95Hz 和 99Hz 时,图像上表现为 2 个漂移光斑随帧频向下方匀速移动。另外,漂移光斑出现的位置程周期变换,重复周期与激光重复频率与视频信号帧频相关。

### 2.3 激光光斑漂移机理分析

考虑到激光漂移光斑出现位置随机且具有窜动特性,试验中通过调整光学镜头瞄准,可以排除激光在光学系统内部反射及折射等的影响,而在镜头移动过程中,激光漂移光斑只出现在图像上出光口位

置垂直方向上,可以判定漂移光斑的出现与 CCD 器件受强光照射饱和串音现象有关。

CCD 器件受脉冲激光照射只在出光口位置垂直方向出现漂移光斑,而不是出现饱和串音光带,该现象可由 CCD 器件电子快门对图像的截取解释。电子快门的使用可使 CCD 摄像机拍摄的运动物体图像细节更加清晰,目前市购 CCD 器件中已广泛应用。CCD 器件快门时间根据被拍摄目标亮度自适应调节,目标及背景亮度愈高,电子快门时间愈短,对于摄像器件,极短的电子快门时间使得 CCD 器件在单帧时间内对景物实现多次曝光,通过帧-行间转移方式或行间转移方式将 CCD 成像区积累的信号电荷转移输出形成图像。

图 5 所示为单帧图像漂移光斑产生机理,单场图像成像时间为 20ms,如果以电子快门时间 1/200s 为例,1 次曝光时间 5ms,单帧图像成像时间内可形成 4 次曝光,视频在形成 1 帧图像过程中会先后逐行扫描到 4 次曝光图像内容。若激光脉冲出现在第 2 次曝光图像中并形成饱和串音,则第 2 幅曝光图像在垂直方向上形成串音光带。形成单帧图像的输出过程中,对第 2 幅图像行间转移电荷包含了饱和串音图像信息,在最终生成的帧图像中,相对位置出现漂移光斑图像。

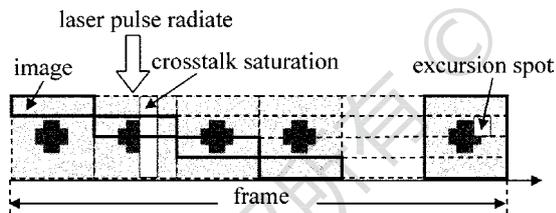


Fig. 5 Formation principle of the excursion laser spots

实验中激光重复频率为 30Hz 时,激光脉冲间隔为 33ms,部分帧在 20ms 成像时间内没有激光脉冲射入,则该帧图像中不会出现激光光斑,部分帧在 20ms 内有 1 个激光脉冲射入,可以看到 1 个漂移光斑。根据脉冲间隔 33ms 与单帧成像时间 20ms 相对位置关系,光斑位置会呈现 5 帧为一周期循环出现。激光重复频率为 60Hz 时,每帧图像中至少会进入 1 个激光脉冲,部分帧会出现 2 个激光脉冲。当激光重复频率接近 100Hz 时,大部分帧进入 2 个激光脉冲,在图像上形成 2 个漂移光斑,激光重复频率为 95Hz 时,脉冲间隔约 10.5ms,帧间隔时间 40ms 后激光脉冲较上一帧延迟约 2.1ms,表现在图像上为漂移光斑向下方移动约 60 行,重复频率为 99Hz 时,2 帧间激光脉冲延迟约 0.4ms,图像上漂移光斑向下方移动约 12 行。上述

分析结果与图 4 中所示实验现象吻合。

### 3 小 结

通过室外实验验证了在昼间自然照明环境下,100Hz 量级重复频率脉冲激光对 CCD 摄像机成像及视频信号的干扰。实验中发现,当接收到的激光能量水平大于 CCD 器件饱和串音阈值时,由于电子快门作用,除激光器出光口处形成的激光光斑图像外,脉冲激光会在激光器出光口垂直方向形成漂移光斑,漂移光斑出现的位置随帧频周期变化,变化周期与脉冲激光重复频率相关。利用 CCD 摄像机电子快门作用机理及图像信号转移方式对该现象做出了解释。该实验结论对于脉冲激光干扰 CCD 图像跟踪系统、CCD 观瞄系统等应用具有参考意义。

### 参 考 文 献

- [1] NI X W, LU J, HE A Zh. Measurement of laser damaging thresholds of CCD devices [J]. Laser Technology, 1994, 18(3):153-165 (in Chinese).
- [2] MA L Y, YU L, LIU J R, et al. Contrastive experimental research of soft-damage on CCD irradiated by XeF laser and YAG frequency-doubled laser [J]. Laser Technology, 2010, 34(4): 510-513 (in Chinese).
- [3] LIU C A, CHEN J B, MA J L, et al. Jamming of visible light array CCD imaging system by infrared laser [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(8):1728-1730 (in Chinese).
- [4] WANG B, LI T, LÜ B D. Active jamming of an infrared seeker with amplitude modulation reticle [J]. Laser Technology, 2006, 30(6):618-620 (in Chinese).
- [5] ZHU Z W, ZHANG Z, CHENG X A, et al. Damage phenomenon and probability of CCD detectors under single-laser pulse irradiation [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(1):113-118 (in Chinese).
- [6] KRUER M, ALLEN R, ESTEROWITZ L, et al. Laser damage in silicon photodiodes [J]. Optical and Quantum Electronics, 1976, 8(5):453-458.
- [7] LI W Y, WANG J B, CHENG X A, 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 (in Chinese).
- [8] LIU Z J, LU Q S, JIANG Z P. Study of damage effect in CCD detectors irradiated locally by laser [J]. Laser Technology, 1994, 18(6):344-347 (in Chinese).
- [9] LIAO H, SUN N C, FENG G Y, et al. Experimental study on 532nm laser-induced failure of array and linear CCD [J]. Laser Technology, 2010, 34(5):643-646 (in Chinese).
- [10] ZHANG Z, CHENG X A, JIANG Z F, et al. Experimental study on saturation effect of visible light CCD induced by 1064nm laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(s1):131-135 (in Chinese).