

文章编号: 1001-3806(2015)03-0416-03

1.06μm 脉冲激光对 TDI-CCD 的干扰实验研究

李晓龙¹, 赵 威^{1,2}, 张雷雷¹, 张启鹏^{1,2}, 康华超^{1,2}, 刘 伟¹

(1. 中国洛阳电子装备试验中心, 洛阳 471003; 2. 光电对抗测试评估技术重点实验室, 洛阳 471003)

摘要: 为了有效对抗时间延迟积分电荷耦合器件成像设备的干扰, 采用脉宽为 10ns、波长为 1.06μm 的脉冲激光对其进行了干扰实验。分析了干扰现象与机理, 采用数字图像处理方法测量了饱和阈值。结果表明, 当激光能量密度为 1.33mJ/cm² 时, 时间延迟积分 CCD 达到饱和; 提高激光重复频率可以取得更有效的干扰效果。

关键词: 激光技术; 干扰机理; 图像处理; 饱和阈值; 脉冲激光; 时间延迟积分电荷耦合器件

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **doi:**10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2015.03.029

Experimental study about 1.06μm pulse laser interference on TDI-CCD

LI Xiaolong¹, ZHAO Wei^{1,2}, ZHANG Leilei¹, ZHANG Qipeng^{1,2}, KANG Huachao^{1,2}, LIU Wei¹

(1. Luoyang Electronic Equipment Test Center of China, Luoyang 471003, China; 2. Key Laboratory of Electro-Optical Countermeasures Test & Evaluation Technology, Luoyang 471003, China)

Abstract: In order to confront time delay integration charge coupled device (TDI-CCD) imaging equipment efficiently, theoretical analysis and experiments about pulse laser interference on TDI-CCD with pulse width of 10ns and wavelength of 1.06μm were conducted. Interference phenomena and mechanisms were analyzed. Saturation threshold was measured by digital image processing method. The results show that saturation threshold is 1.3mJ/cm². Interference will be more effective if pulse repetition frequency is higher.

Key words: laser technique; theory of interference; image processing; threshold of saturation; pulse laser; time delay integration charge coupled device

引 言

时间延迟积分电荷耦合器件(time delayed and integration charge coupled device, TDI-CCD)是近年发展起来的新型图像传感器, 相比一般线阵 CCD, 具有响应度高、动态范围宽等优点, 在探测、识别、照相、遥感和侦察等民用及国防领域发挥了重大作用^[1-2]。激光是对抗 CCD 的有效干扰手段, 在激光辐照 CCD 时, 会产生激光致眩效应, 导致其图像传感性能暂时下降或丧失^[3-4]。脉冲激光具有脉冲宽度窄, 峰值功率高特点, 能够有效破坏光电成像探测器^[5-6], 目前关于脉冲激光对 TDI-CCD 的致眩效应研究报道较少, 因此, 发掘脉冲激光对 TDI-CCD 的干扰现象并深入剖析其机理具有重要研究意义。

本文中开展了 1.06μm 脉冲激光对 TDI-CCD 的干

基金项目: 激光与物质相互作用国家重点实验室开放基础研究基金资助项目 (SKLLIM 201203-02)

作者简介: 李晓龙 (1987-), 男, 工学硕士, 工程师, 主要研究方向为光电对抗、数字图像处理。

E-mail: guangshuaixiaolong@126.com

收稿日期: 2014-04-21; 收到修改稿日期: 2014-05-26

扰实验研究, 检验了脉冲激光对 TDI-CCD 的干扰效果, 分析了干扰机理, 测量了饱和和干扰阈值, 丰富了激光对 TDI-CCD 的干扰理论与成果。

1 激光对 TDI-CCD 的干扰实验

1.1 实验系统简介

本实验中利用 TDI-CCD 作为被干扰对象; 1.06μm YAG 脉冲激光器作为干扰激光源, 实施饱和和干扰; 滤光片用于去除杂散光干扰; 分光片把激光按比例一分而为二, 一部分辐照 TDI-CCD, 一部分照射激光功率/能量计; 衰减片组合用于衰减激光能量; 激光功率/能量计用于实时监测激光能量; 利用图像采集系统存储和分析 CCD 输出图像。实验框图如图 1 所示。

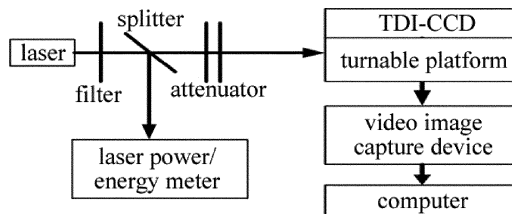


Fig. 1 Experimental layout

主要实验设备参量如表 1 所示。

Table 1 Primary parameters of experimental devices

device name	primary technical parameter
TDI-CCD camera	$f = 50\text{mm}$; $F = 1.4 \sim 32$ detector pixel number: 4096×32 pixel size: $7\mu\text{m} \times 7\mu\text{m}$ maximum line/frame frequency: 68kHz steps: 16/32 turnable platform rotate speed: $20^\circ/\text{s} \sim 50^\circ/\text{s}$
YAG pulse laser	pulse repetition rate: 1Hz ~ 40Hz laser wavelength: $1.06\mu\text{m}$ laser pulse width: 10ns laser energy: 10mJ ~ 40mJ
RM3700 laser power/energy meter	test energy range of energy probe: $30\mu\text{J} \sim 1.0\text{J}$ test wavelength range: $0.18\mu\text{m} \sim 50\mu\text{m}$ resolving power: 15nJ measuring precision: $\pm 5\%$

1.2 实验过程及结果

为减少室外背景光对实验的影响,在实验开始前,遮蔽室内窗户。由于室内大气环境受室外影响很小,因此,室内大气湍流和大气衰减对 TDI-CCD 成像的影响可以忽略不计。

实验步骤如下:(1)按照图 1 布置实验设备,设置 TDI-CCD 与激光器间距 7.3m,调整 TDI-CCD 镜头焦距和光圈大小等参量,使其恰能对目标清晰成像;(2)调整光路,使干扰激光与 TDI-CCD 光学系统镜头准直,设置脉冲激光器输出参量,放置衰减片组,设备开机,逐步减小衰减量,转台带动 TDI-CCD 对目标区域进行扫描成像,关闭室内灯光,脉冲激光器发射干扰激光对 TDI-CCD 干扰,激光能量计测量激光平均能量,图像采集设备采集和存储图像;(3)将图 1 中的激光

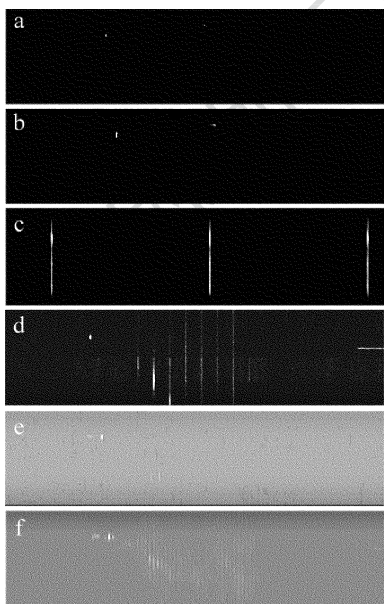


Fig. 2 Typical phenomenon of pulsed laser interference experiment
a—single pulse, decrement 38.4dB, aperture 32 b,c—single pulse, decrement 36.1dB, aperture 32 d— pulse repetition rate 10Hz, decrement 32.4dB, aperture 32 e— pulse repetition rate 20Hz, decrement 32.4dB, aperture 32 f—pulse repetition rate 40Hz, decrement 32.4dB, aperture 32

信号源改为 $1.06\mu\text{m}$ 、功率为 0.2356W、12.2kHz 的高重频激光,重复步骤(2)。

$1.06\mu\text{m}$ 脉冲激光辐照 TDI-CCD 的典型实验现象如图 2 所示。从图 2b 开始出现 6 个饱和像素(灰度值 255),表明在图 2b 状态下,探测器开始进入饱和状态,此时的能量阈值即为饱和阈值。经实验测算得到激光平均能量为 $2.33\mu\text{J}$,光斑面积为 $1.75 \times 10^{-3}\text{cm}^2$,饱和阈值为 $1.33\text{mJ}/\text{cm}^2$ 。

$1.06\mu\text{m}$ 高重频激光辐照 TDI-CCD 的典型实验现象如图 3 所示。

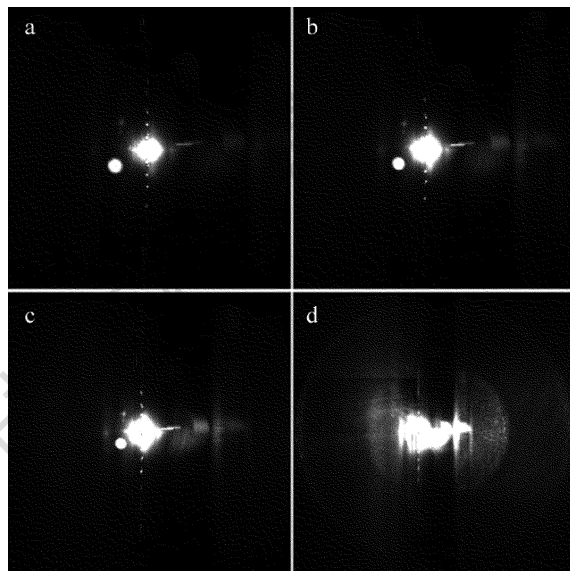


Fig. 3 Typical phenomenon of high frequency laser interference experiment
a—decrement 32.8dB b—decrement 30.1dB c—decrement 26.8dB
d— decrement 17.4dB

2 理论分析

CCD 探测器是 CCD 相机或摄像机的核心器件,以电荷为基本处理信号,具有对信号电荷的产生、收集、传输和检测功能。CCD 探测器作为图像传感器,其像素有面阵、线阵两种基本排列方式。TDI-CCD 是一种面阵 CCD,具有累加积分功能,通过扫描景物输出图像。

CCD 的品种型号很多,参量各异,但其结构和原理基本相同,都是由光敏区、转移存储区和驱动电路组成^[7]。激光对 CCD 饱和和干扰后,探测器仍有信号输出,但会出现功能性退化或暂时失效,信噪比会大大下降。强激光辐照 CCD 产生的饱和现象是由 CCD 器件结构决定的^[8]。CCD 探测器的每个像元可等效为一个电容,CCD 像元在受到光照后,能够形成电子势阱。由于电子势阱存储和处理的最大电子电荷数是一定的,当照射在 CCD 光敏面上的光强增大到一定程度时,将产生足够多的光生电荷充满势阱,导致 CCD 像

元出现势阱饱和。而后继续增大光强,光生电荷将向相邻的探测单元及传输势阱溢出,形成 CCD 光饱和串音^[9-10]。CCD 的饱和阈值表征 CCD 的抗干扰能力,表现了器件所能承受的破坏能力,是 CCD 的重要性能指标。脉冲激光对 CCD 的饱和干扰阈值与 CCD 势阱容量、积分时间、激光辐照面积、辐照时间、波长、靶面像素数等因素有关,与重频无关。

由于脉冲激光的重频远低于 1kHz,CCD 积分时间一般为毫秒量级,相邻的两个脉冲间隔远大于 CCD 积分时间,即 CCD 的被干扰时间远小于脉冲激光辐照时间,因此在脉冲激光连续辐照 CCD 的过程中,在 CCD 积分时间内进入探测器并干扰其成像的脉冲个数极少,绝大多数脉冲激光仅作用在探测器表面,而未对后端处理电路产生影响,因而也就不会对相机成像产生干扰。显然,提高激光重频,在 CCD 积分时间内入射到靶面更多的激光脉冲,可对 CCD 产生累积干扰效应,从而增强干扰效果。

由实验结果可知,脉冲激光对 TDI-CCD 的干扰现象与普通 CCD 是不尽相同的。

单脉冲激光干扰 TDI-CCD 输出图像中的每个干扰条纹的宽度均为 32pixel,恰为 TDI-CCD 的设置积分级数,且对其它成像区域没有串扰。分析现象原因是 TDI-CCD 成像过程采用时间延时积分,输出图像为各个积分级成像效果的累加,只要任一级达到饱和,该处图像即达到饱和,宽度为积分级数 × 像素宽度。实验中采用的 TDI-CCD 是由多块相互独立的 512pixel × 32pixel 探测器拼接而成,最终所成的图像也由这多块探测器分别输出的图像拼接而成。其中每块探测器单独成像,光电转换信号不会产生耦合串扰,因此,在其中一块探测器产生的饱和干扰信号不会影响其余几块探测器的成像。

实验时设置激光器在图像中的左上区域,但在该区域并未出现干扰条纹。分析现象原因是脉冲激光重频远小于 TDI-CCD 扫描频率,当相机扫过激光器位置时,激光器总是未发射激光,或是在相机积分时间内,恰好没有激光进入探测器,因此在图像中的激光器位置总是没有干扰条纹。鉴于此,通过提高实验中使用的脉冲激光的重频,显著增加了图像中的干扰条纹数量(如图 2c ~ 图 2f 所示),而且相邻干扰条纹间距为 $3500/f$ 个像素(其中,3500Hz 为 TDI-CCD 扫描频率值, f 为激光频率值)。因此,提高脉冲激光重频,能够增加干扰条纹数量,增强干扰效果,而且当激光重频不

小于 $f_{\max}/32\text{kHz}$ 时(其中 f_{\max} 为 TDI-CCD 的最大设计扫描频率),会对 TDI-CCD 产生全屏干扰,使目标信息完全丧失。显然,由于脉冲激光重频远小于 1kHz,因此,采用高重频激光或连续激光干扰 TDI-CCD,能够实现更理想的干扰效果。如图 3 所示,当衰减 26.8dB 时,图像中的光斑弥散面积显著增大,在光斑中心出现了黑点,表明探测器达到了过饱和状态。高重频激光相比重频低的脉冲激光能够取得更理想的干扰效果。

3 结 论

通过开展脉宽为 10ns、波长为 $1.06\mu\text{m}$ 的脉冲激光辐照 TDI-CCD 的干扰实验研究,测得当阈值为 $1.33\text{mJ}/\text{cm}^2$ 时,TDI-CCD 达到像元饱和。分析实验现象表明,由于 TDI-CCD 与普通 CCD 成像机制不同,脉冲激光对二者的干扰效果也不尽相同。重频较低的脉冲激光对 TDI-CCD 的干扰效果有限,使用高重频激光实施干扰可显著提高干扰效果。

参 考 文 献

- [1] WANG D J, LI W M, XU Y S, *et al.* A fast auto focusing technique for the TDI-CCD panoramic aerial camera[J]. *Journal of Optoelectronics*, 2012, 23(8): 1452-1456(in Chinese).
- [2] ZHANG L, HAO W, SHAO M I, *et al.* Experiment study on saturation effect of $1.06\mu\text{m}$ laser jamming TDI-CCD camera[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(s1): 3128-3132(in Chinese).
- [3] SUN Ch W. The effect of laser irradiation[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002:360-379(in Chinese).
- [4] JIANG T, CHENG X A. Study on regular distribution of bright points with 3CCD irradiated by laser[J]. *Laser Technology*, 2010, 34(2): 168-169(in Chinese).
- [5] WANG Sh Y, FU Y Y, GUO J. Study of disturb effect to array CCD detectors irradiated locally by pulse laser[J]. *Applied Laser*, 2001, 21(5): 317-318(in Chinese).
- [6] SHEN H B, SHEN X J, ZHOU B. Experimental study on 532nm laser-induced CCD[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, 21(10): 1449-1454(in Chinese).
- [7] LIAO H, SUN N Ch, SUN G Y, *et al.* Experimental study on 532nm laser-induced failure of array and linear CCD[J]. *Laser Technology*, 2010, 34(5): 643-645(in Chinese).
- [8] ZHANG Zh, CHENG X A, JIANG Z F. Excessive saturation effect of visible light CCD[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, 20(6): 917-920(in Chinese).
- [9] DURÉCU A, BOURDON P, VASSEUR O. Laser-dazzling effects on TV-cameras; analysis of dazzling effects and experimental Parameters weight assessment [J]. *Proceedings of the SPIE*, 2007, 6738: 67380L.
- [10] 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).