

激光干扰 CCD 规律圆形条纹作用机理分析

邹前进, 陈前荣, 黄振宇, 李 华, 黄成功, 齐凤杰, 王彦斌

(中国人民解放军 63892 部队, 河南 洛阳 471003)

摘 要: 在内场 31.5 m 的距离进行了 YAG 脉冲激光干扰 CCD 成像系统实验, 首次出现了规律性圆形条纹。通过对实验过程、圆形条纹中心相对强度分布和成像特性结果分析, 确定规律性圆形条纹产生的条件稳定, 且是光学系统固有的; 规律性圆形条纹与干扰亮斑成像特性不同。针对可能产生规律性圆形条纹的多种衍射和干涉, 结合圆形条纹中心亮斑大小、圆形条纹位置分布、圆形条纹相对强度分布、成像特性和产生的可能性, 进行了理论分析和实验结果对比。研究表明: 实验中规律性圆形条纹为光学系统胶合透镜上下表面反射激光所产生的等厚干涉条纹。

关键词: 激光干扰; CCD; 规律性圆形条纹; 等厚干涉

中图分类号: TN248.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)08-2017-05

Mechanism analysis of regular concentric rings on laser disturbing CCD detector

Zou Qianjin, Chen Qianrong, Huang Zhenyu, Li Hua, Huang Chenggong, Qi Fengjie, Wang Yanbin

(Unit 63892 of PLA, Luoyang 471003, China)

Abstract: The concentric rings were reported for the first time when 532 nm YAG pulsed laser interfered CCD imaging system at the distance of 31.5 m under infield. According to analysis of experimental process, relative intensity distribution of concentric rings and imaging properties of CCD system, the generation conditions of concentric rings were found to be stable and inherent to the optical system. Meanwhile, the imaging properties of the concentric rings and laser spot were different. Aiming at various diffractions and interferences of the CCD optical system, the theory analysis and contrast of experimental results were done by combining with central spot size, positional distribution, relative intensity distribution, imaging properties and occurring probability of concentric rings in this paper. The results indicate that the concentric rings are formed from equal thickness interference of reflected laser between the top and bottom surface of the optical system cemented lens.

Key words: laser jamming; CCD; regular concentric rings; equal thickness interference

收稿日期: 2013-02-20; 修订日期: 2013-06-10

基金项目: 国家自然科学基金(10974255/A040403)

作者简介: 邹前进(1982-), 男, 硕士, 主要从事光电对抗方面的研究。Email: zouqianjin1982@163.com

0 引言

针对不同波段^[1-3]、距离^[2,4]、重频^[5-6]、入射角^[7]及功率^[8]等条件,国内相关学者进行了大量激光干扰效应试验,但主要集中在阈值测量、机理分析和效果评估等^[5-9]。理想情况下激光经光学系统汇聚成点光斑,但实际实验出现了大面积激光散布^[8],甚至出现规律性圆形条纹^[10],说明干扰激光经光学系统传输时还存在其他效应。所以明确规律性圆形条纹产生的机理,对光电成像制导设备激光干扰效果评估、激光干扰模式选择、激光干扰效应图像仿真和内外场激光干扰效应一致性分析均有重要意义。

针对出现规律性圆形条纹的现象,在目前相关内场激光干扰实验中尚未见相关报道。文中在内场进行了激光干扰 CCD 成像系统实验,出现了规律性圆形条纹。通过对规律性圆形条纹实验和理论分析得到:实验中出现的规律性圆形条纹为光学系统胶合透镜上下表面反射激光所产生的等厚干涉条纹。

1 实验及结果分析

实验布局如图 1 所示。实验中激光器为北京镭宝公司 Nd:YAG 激光器:束散角为 3 mrad,单脉冲能量为 50 mJ,重复频率 f 为 10 Hz、50 Hz 和 100 Hz 可调,对应输出功率为 0.5 W、2.5 W 和 5 W。CCD 为深圳格林斯克公司 CSK-608B 型黑白 1/3 in (1 in=2.54 cm) CCD:像素规模为 576×704,感光面积为 4.8 mm×3.6 mm。实验中干扰距离为 31.5 m, CCD 固定在转台上,通过旋转转台改变干扰激光与光学系统之间的入射角 θ 。

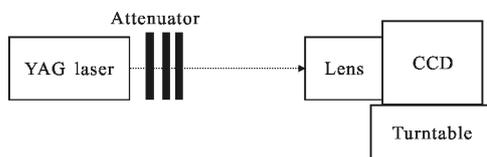


图 1 激光干扰 CCD 成像系统实验装置图

Fig.1 Experimental set-up of laser jamming to CCD imaging system

调节转台,使得干扰激光与光学系统之间的入射角 θ 为 2.96°。实验中衰减片衰减倍率 η 从 105 dB 开始减小,同时调整激光重复频率。在衰减倍率 η 为 15 dB,重复频率 f 为 50 Hz 和 100 Hz 时,在亮斑周围出现了内疏外密的规律性圆形条纹,如图 2 和图 3 所示。

由图 2 和图 3 可知:到达探测器表面干扰激光功率密度较大,CCD 发生了饱和和溢出^[1],亮斑中心可近似做为干扰激光理想成像点。同时可以看出规律性圆形条纹中心与亮斑中心并不重合,说明两者中心对应的空间频率不同,即成像目标不同。根据实验中规律性圆形条纹产生过程,结合图 2 和图 3,可以判定产生规律圆形条纹的条件是稳定的,且是光学系统固有的。因为,如果规律性圆形条纹是光学系统中胶合透镜组胶质受热软化松动导致的间隙所引起^[10],则胶质的软化及松动一定与激光功率相关,激光功率的变化会导致规律性圆形条纹图案的变化,图 3 干扰激光功率密度较图 2 大一倍,但实验中规律性圆形条纹位置没有发生变化,只是更加清晰;实验中衰减片衰减倍率需降低到一定程度才能看见条纹,说明规律性圆形条纹本身可见度较差,只有激光功率达到一定值才能被探测到。

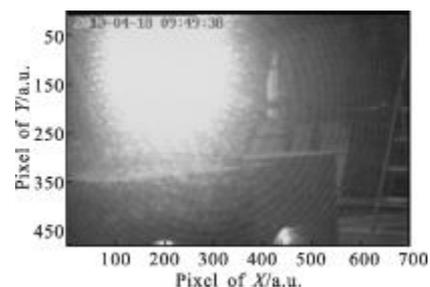


图 2 入射角 2.96°、衰减倍率 15 dB、重频 50 Hz 干扰图像
Fig.2 Laser dazzled image at $\theta=2.96^\circ$, $\eta=15$ dB and $f=50$ Hz

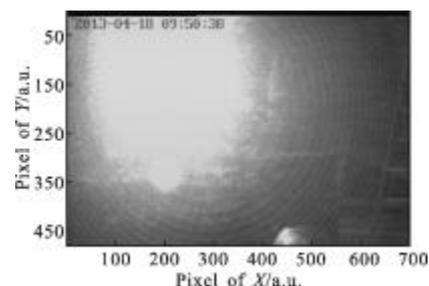


图 3 入射角 2.96°、衰减倍率 15 dB、重频 100 Hz 干扰图像
Fig.3 Laser dazzled image at $\theta=2.96^\circ$, $\eta=15$ dB and $f=100$ Hz

调节转台,使得干扰激光与光学系统之间的入射角 θ 为 0.73°。衰减倍率 η 和重复频率 f 的调节方法同上,在 η 为 20 dB, f 为 50 Hz 和 100 Hz 时,观察到规律性圆形条纹。重复频率 f 为 100 Hz 时,实验结果如图 4 所示。

图 5 给出了经过图 4 亮斑中心水平黑线所示一行数据灰度分布变化,实验结果与参考文献[8]类似,说明亮斑主要由干扰激光的光学系统衍射、散射及 CCD 饱和溢出导致。但由图 5 无法看出规律性圆形

条纹灰度变化趋势。

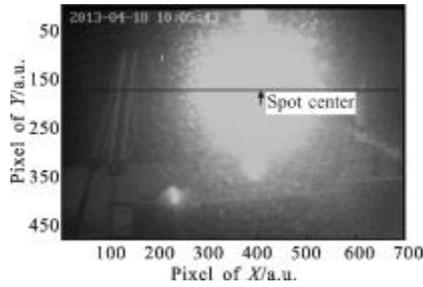


图 4 入射角 0.73°、衰减倍率 20 dB、重频 100 Hz 干扰图像
Fig.4 Laser dazbled image at $\theta=0.73^\circ$, $\eta=20$ dB and $f=100$ Hz

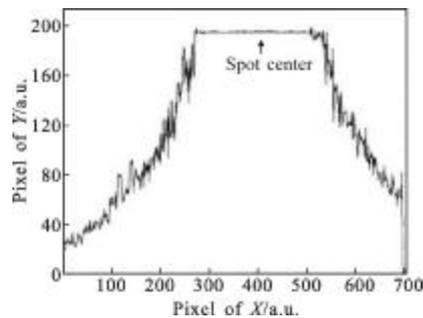


图 5 光斑中心行灰度分布图
Fig.5 Grey value distribution of laser spot center line

调节转台,使得干扰激光与光学系统之间的入射角 θ 为 4.8°和 6.8°。衰减倍率 η 和重复频率 f 的调节方法同上,在 η 为 20 dB, f 为 50 Hz 和 100 Hz 时,观察到规律性圆形条纹。重复频率 f 为 100 Hz 时,实验结果如图 6 和图 7 所示。

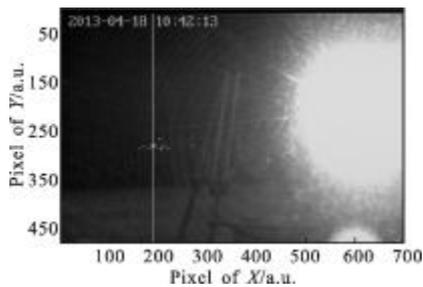


图 6 入射角 4.8°、衰减倍率 20 dB、重频 100 Hz 干扰图像
Fig.6 Laser dazbled image at $\theta=4.8^\circ$, $\eta=15$ dB and $f=100$ Hz

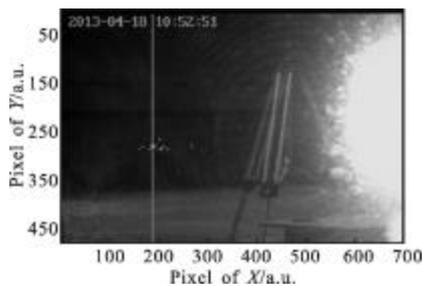


图 7 入射角 6.8°、衰减倍率 20 dB、重频 100 Hz 干扰图像
Fig.7 Laser dazbled image at $\theta=6.8^\circ$, $\eta=15$ dB and $f=100$ Hz

调节转台,使得干扰激光与光学系统之间的入射角 θ 为 9.3°。衰减倍率 η 和重复频率 f 的调节方法同上,在 η 为 20 dB, f 为 50 Hz 和 100 Hz 时,观察到规律性圆形条纹。重复频率 f 为 100 Hz 时,实验结果如图 8 所示。选取受主光斑干扰较小的一块区域,如图 8 中白色方框所限定,其灰度三维变化趋势如图 9 所示。可以看出:规律性圆形中心灰度与其他各级圆形条纹灰度相差不大。经统计,沿图 8 所示黑色对角线上明暗圆形条纹灰度值差在 15~20 之间,且都属于 CCD 线性响应区,与图 5 干扰激光亮斑灰度值有本质区别。由图 9 可以看出,规律性圆形条纹亮纹灰度从外围至中心逐渐增大,但明显是由于干扰激光的光学系统散射所导致。

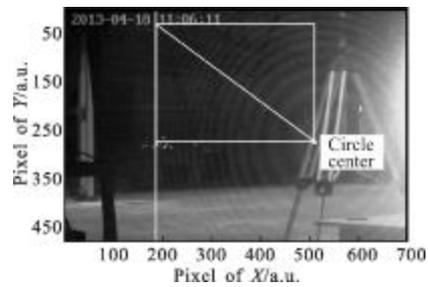


图 8 入射角 9.3°、衰减倍率 20 dB、重频 100 Hz 干扰图像
Fig.8 Laser dazbled image at $\theta=9.3^\circ$, $\eta=20$ dB and $f=100$ Hz

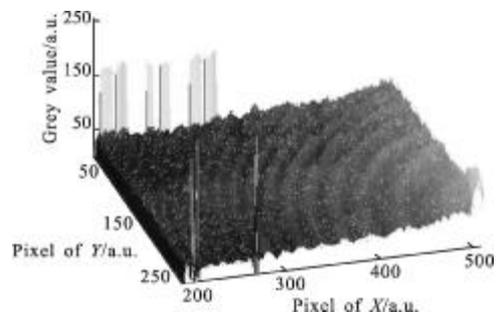


图 9 圆形条纹灰度分布图
Fig.9 Grey value distribution of concentric rings

由实验结果可以看出,文中规律性圆形条纹具有如下特征:(1) 规律性圆形条纹内疏外密,条纹中心及各级条纹相对强度差别较小,且与干扰激光亮斑相对强度差别巨大;(2) 规律性圆形条纹中心与激光亮斑中心不重合;(3) 规律性圆形条纹产生条件稳定,且应是光学系统固有的,但需要激光功率达到一定程度才能被探测到。

2 理论分析

由光的衍射和干涉理论:光学系统孔径光阑衍

射、光学系统本身孔径衍射、光学系统外力破坏贯通小孔衍射、激光光斑衍射、分波面双光束干涉、等倾干涉、等厚干涉等均有可能产生同心圆形条纹^[11-13]。但不同机理形成的圆形条纹中心光斑大小、条纹位置分布、条纹相对强度分布、成像特性和产生可能性是不同的。

2.1 衍射

理想光学系统成像时，相当于汇聚的球面波照明光学系统光阑，观测面上得到的衍射图像等效于一个平面波垂直照明该衍射孔径产生的夫琅禾费衍射图样^[12]。不同的光阑衍射图像不同，圆形孔径衍射为圆环，矩形孔径衍射为 SINC 函数，六边形孔径衍射为六星芒，参考文献[14]中出现了明显光阑衍射。假设光阑半径为 1 mm、接收屏半径为 2.46 mm、光阑距离接收屏为 25 mm、波长为 532 nm，圆形条纹相对强度分布局部放大后如图 10 所示。

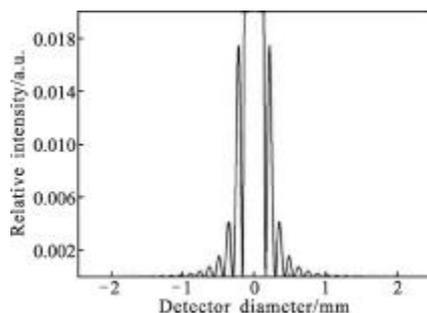


图 10 光阑衍射圆形条纹相对强度分布图

Fig.10 Relative intensity distribution of concentric rings in aperture diffraction

可以看出圆环中心相对强度明显大于其他各级衍射圆环，同时光学系统光阑衍射中心应在汇聚球面波的中心^[12]，即规律性圆形条纹中心与干扰亮斑中心重合，均与文中实验情况不符。

对于光学系统本身孔径衍射和光学系统外力破坏贯通小孔衍射，其圆形条纹相对强度分布与图 10 基本一致；同时光学系统本身孔径衍射中心亮斑大小只有干扰激光波长数倍^[11]；贯通的小孔必然影响光学系统成像特性，所以从圆形条纹相对强度分布、中心亮斑大小和产生的可能性上均可排除上述两种衍射。

2.2 激光光斑衍射

当光学系统元件受到很小损伤，可认为其退化为圆形散射源，在激光束经过损伤的时候，会产生明暗相间圆形条纹^[13]。假设衍射源半径为 30 μm 、接收屏半径为 2.46 mm、衍射源距离接收屏为 250 mm、波长为 532 nm，圆形条纹相对强度分布如图 11 所示。

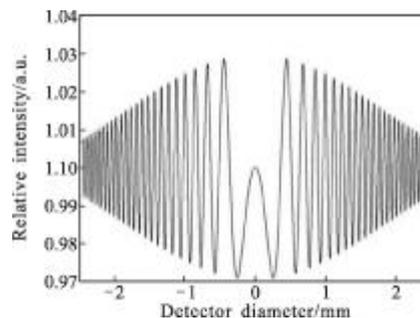


图 11 激光光斑衍射圆形条纹相对强度分布图

Fig.11 Relative intensity distribution of concentric rings in laser spot

图 11 圆形条纹相对强度分布与图 9 存在差异，同时损伤散射源产生的干涉条纹一般处于损伤位置后，根据上文实验过程和实验结果可排除激光光斑衍射。

2.3 分波面双光束干涉

分波面双光束干涉在空间场中形成回转双曲面族的干涉条纹^[11]，但只有承接光屏与两相干点光源连线垂直时才能得到同心圆形条纹，且中心无亮斑。当干扰激光入射角变化时，圆心条纹形状应发生变化，与实验情况不符。

2.4 等倾干涉

等倾干涉发生的条件为光电成像系统等效存在“厚度均匀的空气薄膜”和干扰激光在某一元件表面散射看作扩展光源，等倾干涉条纹尺寸与其成像的透镜焦距相关。假定在某一元件前表面透过率为 0.95，后表面透过率为 0.95，接收屏半径为 2.46 mm，波长为 532 nm，等效空气薄膜厚度为 50 μm ，成像焦距为 6 mm，圆形条纹相对强度分布如图 12 所示。

图 12 圆形条纹相对强度分布与图 9 相似，均是内疏外密，且相对强度相差不大。但等倾干涉条纹位置只与形成条纹的光束入射角有关，而与光源位置无关^[11-12]，与上文圆形条纹中心移动情况不符。

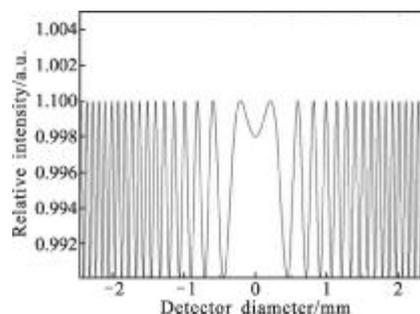


图 12 等倾干涉圆形条纹相对强度分布图

Fig.12 Relative intensity distribution of concentric rings in equal inclination interference

2.5 等厚干涉

干涉中心为亮斑,则更可能为透射光等厚干涉。透射光学系统存在胶合的透镜组,与形成牛顿环的结构相似。假定在某一元件前表面透过率为 0.95,后表面透过率为 0.95,透镜曲率半径为 700 mm,胶合厚度为 $26.8 \mu\text{m}$,接收屏半径为 2.464 mm,波长为 532 nm,圆形条纹相对强度分布如图 13 所示。

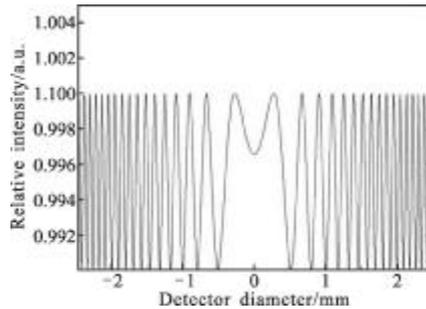


图 13 等厚干涉圆形条纹相对强度分布图

Fig.13 Relative intensity distribution of concentric rings in equal thickness interference

图 13 圆形条纹相对强度分布与图 9 相似,亦是内疏外密,且相对强度相差不大。同时随着入射光角度的增大,等厚干涉条纹不再近似定域在干涉位置表面^[1],即目标位置发生改变,与文中实验情况相符。从圆形条纹相对强度、中心亮斑大小、光学系统本身特性和产生的可能性上,可初步认定规律性圆形条纹为光学系统胶合上下表面反射激光所产生的等厚干涉条纹。

3 结论

在内场进行了激光干扰 CCD 成像系统实验,首次出现了规律性圆形条纹。结合实验过程和实验结果对规律性圆形条纹特征进行了分析。通过理论和实验结果对比,并结合圆形条纹中心亮斑大小、条纹位置分布、条纹相对强度分布、成像特性和产生的可能性多种因素,判断文中规律性圆形条纹为光学系统胶合透镜上下表面反射激光所产生的等厚干涉条纹。针对衍射、干涉等可能产生探测器靶面激光能量散布的实验和理论研究,对研究靶面激光能量散布的条件、可能性,初步定量分析干扰激光在光电成像系统靶面能量分布、激光干扰效应图像仿真和激光干扰模式等有重要意义。

参考文献:

- [1] Zheng 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. (in Chinese)
- [2] Chu Xuelian, Qiu Zhenan, Zhang Zhensheng, et al. Experimental research of infrared detecting system disturbed by mid-wave infrared laser [J]. Infrared Technology, 2011, 33(8): 440-443. (in Chinese)
- [3] Che Jinxi, Zhang Hengwei, Wang dong, et al. Experiment study on the saturation thresholds of uncooled IR imaging irradiated by $10.6\mu\text{m}$ CO₂ laser[J]. Laser & Infrared, 2010, 40(8): 855-859. (in Chinese)
- [4] Wang Siwen, Guo Lihong, Zhao Shuai, et al. Experiments of high-power CO₂ laser disturbance to far-field HgCdTe detectors[J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(4): 798-803. (in Chinese)
- [5] Li Wenyu, Wang Jinbao, Cheng Xiangai, 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)
- [6] 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. (in Chinese)
- [7] 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)
- [8] Han Kai, Xu Xiaojun. Study on saturation area of detector based on envelop of Airy function [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37: 94-97. (in Chinese)
- [9] Sun Yunqiang, Cheng Xiang'ai, Wang Fei. Method of quality evaluation aimed at laser disturbing image [J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(5): 659-662. (in Chinese)
- [10] Che Jinxi, Xu Xiaojun, Zhang Hengwei, et al. Mechanism of laser flare in the infrared imaging system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(8): 1537-1541. (in Chinese)
- [11] Born M, Wolf E. Principles of Optics [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007: 240-286. (in Chinese)
- [12] Ji Jiarong. Course of Higher Optics [M]. Beijing: Science Press, 2007: 222-229. (in Chinese)
- [13] Jia Wen, Tang Huijun, Yan Minqi, et al. Detection of diffraction rings in the laser spot [J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(6): 1477-1481. (in Chinese)
- [14] 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. (in Chinese)