

## 激光对推扫相机的干扰

康文运<sup>1</sup>, 危峻<sup>2</sup>, 宋小全<sup>1</sup>, 王禹<sup>1</sup>

(1. 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094;

2. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

**摘要:**针对激光对推扫相机干扰效应及其干扰机理等疑难问题,构建了一套推扫相机激光干扰实验系统.描述了实验系统组成、实验方法和步骤,开展了激光对推扫相机干扰实验,给出了实验结果.从线阵 CCD 探测器的结构和图像处理层面出发,对出现的干扰现象进行了机理分析,利用实验数据拟合出了相机入瞳激光功率与干扰面积的对应关系,分析了影响推扫相机输出图像上激光干扰面积的主要因素,并与激光对凝视相机的干扰进行了对比分析.该研究成果可应用于激光对推扫相机干扰效果评价和相机激光防护研究等方面.

**关键词:**激光干扰;推扫相机;干扰机理分析;线阵 CCD 探测器

**中图分类号:**TN249 **文献标识码:**A

## Jamming of laser to push-broom camera

KANG Wen-Yun<sup>1</sup>, WEI Jun<sup>2</sup>, SONG Xiao-Quan<sup>1</sup>, WANG Yu<sup>1</sup>

(1. Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China;

2. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

**Abstract:** Push-broom camera has been widely applied to aviation and spaceflight remote sensing for the earth. Due to its big optical gain, it is prone to laser jamming. Jamming problem of laser to push-broom camera is noticed at all times. In allusion to jamming effects and mechanism difficulty problem of laser to push-broom camera, a jamming experiment system of laser to push-broom camera has been constructed. Laser jamming experiment to push-broom camera has been done, experiment result is presented. Laser jamming mechanism was analyzed on basis of the configuration of linear CCD detector and image processing principle. The relation of camera pupil entrance laser power and image jamming area was established using experiment data. Most factor of affecting camera image jamming area was analyzed. Jamming of laser to push-broom camera and gaze camera was compared. This result can be used for evaluating laser jamming effect to push-broom camera and researching camera laser protection method.

**Key words:** laser jamming, push-broom camera, jamming mechanism analysis, linear CCD detector

**PACS:** 42.30.Va, 42.79.Pw, 82.50.Hp

### 引言

推扫相机一般搭载于航天和航空飞行平台上,通过平台运动对地推扫成像.目前在航天航空遥感、对地成像侦察和导弹预警等方面已得到广泛应用,然而,由于推扫相机的作用距离一般较远,其光学增益较高,比较敏感,容易受到各种光信号干扰.激光光束质量好,峰值功率密度高,适合远距离传输,是干扰各类光学相机的重要手段,因此,激光对相机干扰问题已受到了世界各国的关注.

研究激光对光学相机的干扰效应是发展高效激

光应用系统、评价激光对相机的干扰效果以及相机激光防护设计的重要一环,国内外围绕激光对光学相机干扰这个问题开展了不少探索研究工作<sup>[1-5]</sup>,但主要以 CCD 探测器件和面阵 CCD 凝视相机为对象,激光对推扫相机干扰研究方面较少.推扫相机采用线阵 CCD 或 TDI-CCD 探测器,通过平台运动推扫成像,其相机光学结构和成像方式与面阵 CCD 凝视相机有较大差异,因此,有必要深入开展激光对推扫相机干扰实验研究和机理分析工作.

本文围绕激光对推扫相机干扰进行了实验研究,构建了激光干扰实验系统,开展了激光对推扫相

机干扰实验,对出现的干扰现象进行了分析,并利用实验数据拟合出了相机入瞳激光功率与图像干扰面积的对数关系。

## 1 实验

### 1.1 实验系统组成

实验系统包括脉冲激光器、隔离器、反射镜、衰减器(光学衰减片、可调衰减器和格兰泰勒棱镜)、光阑、扩束镜(包括一级扩束、光束提升器、二级扩束)、平面反射镜、转台、推扫模拟相机、反射式会聚镜、激光功率能量计、光具支架和光学平台等。实验系统组成及光路图如图1所示。

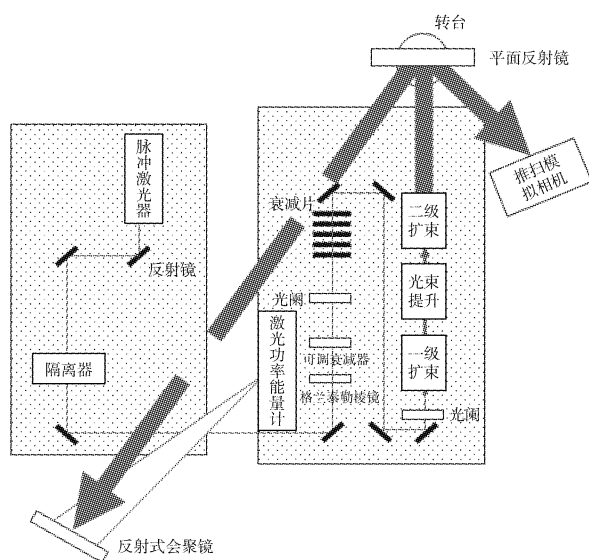


图1 推扫相机激光干扰实验系统组成图  
Fig. 1 Diagram of laser jamming experiment system of push-broom camera

脉冲激光器采用波长  $0.532\ \mu\text{m}$  高重频激光,为实验提供光源。

隔离器防止激光返回损伤激光器,同时将激光器发出的圆偏振光转换为线偏振光。

反射镜用于改变光束传播方向,光阑用于减少杂散光。

衰减器在实验时用于调节相机入瞳处激光功率密度。

扩束镜用于扩展光束直径,压缩激光发散角,使光束覆盖相机入瞳口径,模拟远场激光照射激光相机入瞳的情况。

转台与平面反射镜配合实现推扫成像过程,模拟推扫相机与激光束的相对运动关系。

推扫模拟相机入瞳直径  $200\ \text{mm}$ , F 数 2.6, 采用

2048 像素线阵 CCD 探测器。

反射式会聚镜将大光斑会聚成小光斑,以便于用激光功率/能量计测量相机入瞳功率。

### 1.2 实验方法和步骤

实验按照下列方法和步骤开展:

1) 调整实验系统光路,设置实验设备参数,转台带动平面反射镜转动,模拟推扫相机实际推扫成像时的运行角速度,使推扫相机对远处景物正常成像,记录相关设备状态数据;

2) 调整激光器、衰减器有关参数,降低激光束功率,转台带动平面反射镜转动,使推扫相机对激光光斑成像,要求像面上光斑仅中心几个像元饱和,测量相机像面上初始激光光斑大小;

3) 调整激光衰减器参数,增大激光束功率,转台带动平面反射镜转动,使扩束后激光经平面反射镜反射进入推扫模拟相机入瞳,在相机 CCD 探测器上成像,记录相机的输出图像;

4) 转动转台将扩束后经平面反射镜反射的激光通过反射式会聚镜聚焦于功率/能量计探头上,读取并记录此时的激光功率;

5) 调整入射激光束功率,重复步骤 3 和 4 实验过程,直至完成所有预定入瞳功率的干扰效应实验。

## 2 实验结果与分析

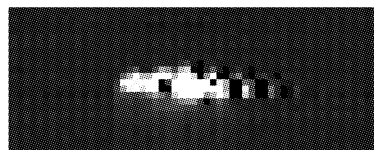
### 2.1 干扰现象

主要实验现象表现为:

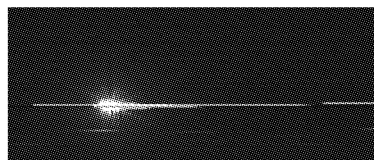
1) 在照射激光功率较低时,像面上出现局部饱和和亮斑。典型干扰图像如图 2(a) 所示。

2) 增大照射激光功率,饱和亮斑扩大,随着照射激光功率进一步增加,出现白色串扰线和黑色反转线。典型干扰图像如图 2(b) 所示。

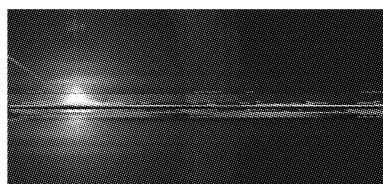
3) 若进一步增大照射激光功率,白色串扰线和黑色反转线面积将扩大,形成白色串扰线和黑色反转线混杂的干扰带。典型干扰图像如图 2(c) 所示。



(a) 相机入瞳激光功率  $25\ \text{nw}$  干扰图



(b) 相机入瞳激光功率  $2.7\ \mu\text{w}$  干扰图



(c) 相机入瞳激光功率530 μw干扰图

图2 激光对推扫相机干扰图

Fig. 2 Diagram of laser jamming to push-broom camera

## 2.2 机理分析

照射激光信号经推扫相机光学系统会聚后在 CCD 探测器焦平面上形成一个微小光斑,在相机推扫的过程中光斑扫过线阵 CCD 探测器。

激光信号经 CCD 探测器形成光生电荷,随着激光照射信号增强,光生电荷将直接照射像元处的电荷储存势阱充满后就溢出至其它像元的电荷储存势阱中,其它像元的电荷储存势阱储存的是背景光生电荷,溢出电荷将周围电荷储存势阱充满,在输出图像中就形成了局部饱和和亮斑.随着激光照射信号的进一步增强,在 CCD 探测器中形成的大量光生电荷一方面向周围其它像元储存势阱溢出,同时将通过电荷转移通道溢出到其它像元的移出信号中,最后形成了白色亮线,输出图像中出现了串扰现象<sup>[6-8]</sup>.激光饱和干扰及串扰形成原理如图3所示。

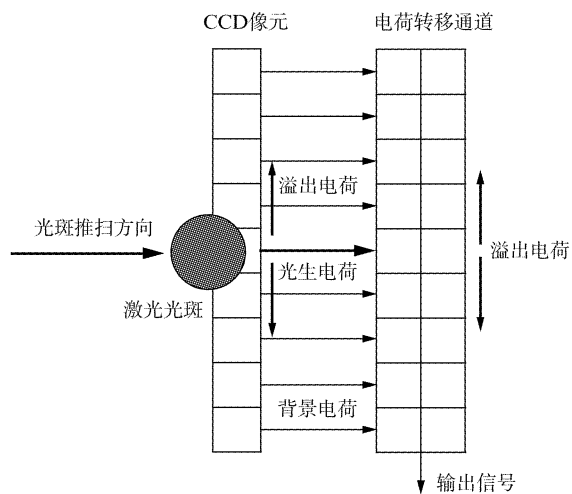


图3 激光干扰形成原理示意图

Fig. 3 Diagram of creating laser jamming's principle

CCD 的信号读出机理为电荷的转移,读出电路将电荷转换为电平. CCD 的每个像素输出信号等于目标信号电平减去复位电平,CCD 在受到激光干扰

时随着照射光强增加其输出信号变化过程如图4所示。

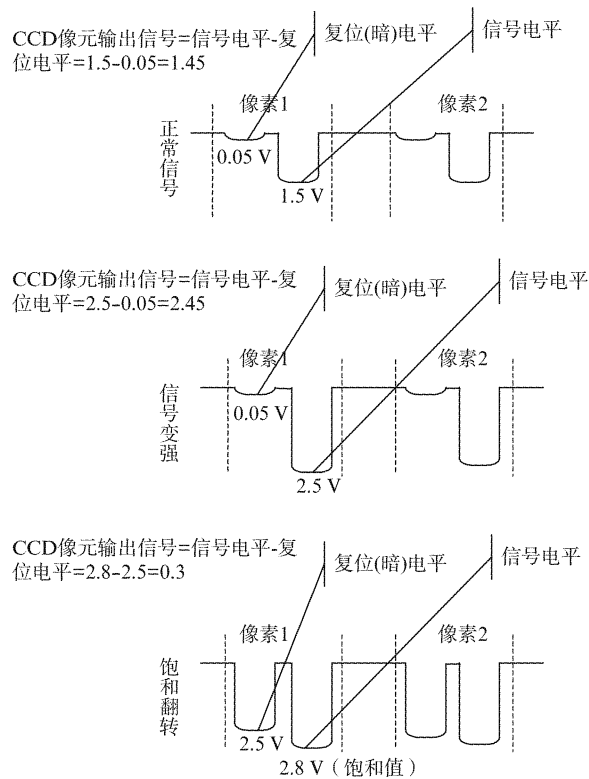


图4 CCD受激光干扰时输出信号变化示意图

Fig. 4 Diagram of CCD output signal change on laser jamming

由图4可以看出:随着照射激光光强增大,CCD 信号电平变大(负向变大),复位电平不变,输出信号正常变大,像面上出现局部饱和和光斑.若进一步增大照射激光光强,照射光斑处饱和像素的光电子就溢出到其它像元,这时就出现了白色串扰亮线。

当照射激光光强特别大时,导致 CCD 信号电平饱和,此时,电荷积累太多,造成 CCD 复位电平出现紊乱<sup>[9-10]</sup>,致使其输出电平增大(正常光强下基本不变),信号电平减去出现紊乱的复位电平反而变小,因此,CCD 输出信号就出现了过饱和黑色的反转线。

## 2.3 影响图像上干扰面积因素分析

在推扫相机 CCD 探测器积分时间和转台转速设置一致的情况下,分别采用 0.532 μm 皮秒激光(脉宽约 20 ps、重频 1 kHz)和 0.532 μm 纳秒激光(脉宽约 60 ns、重频 6 kHz)进行干扰实验,相机入瞳激光功率(即进入相机内部的激光功率)和图像上干扰线条数的对应关系如图5所示。

由上图可以看出,图像上干扰线条数随相机入

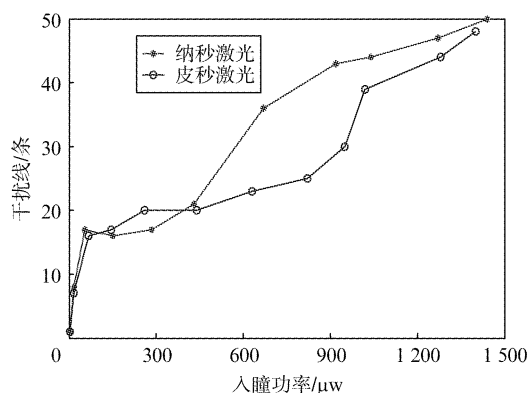


图5 相机入瞳激光功率与图像上干扰线条数关系曲线

Fig. 5 Dependence of jamming line in the image on camera pupil entrance laser power

瞳激光功率增加而单调递增,在入瞳功率密度相同的情况下,皮秒激光和纳秒激光对相机的干扰效果基本一致.二者存在偏差的主要原因:一是由于图像上干扰线统计误差,由图2可以看出,干扰线不好精准判别;二是由于入瞳激光功率测量也存在误差,一般约有10%的波动.因此,影响推扫相机图像干扰面积的主要因素是相机入瞳激光功率.

在相机入瞳激光功率和 CCD 探测器积分时间都相同的情况下,在 CCD 探测器积分时间内,照射到探测器上的激光光子数相同.由于激光波长相同,光电转换效率相同,在 CCD 探测器内产生的光生电荷数量基本一样,因此,在入瞳功率相同的情况下,尽管皮秒激光和纳秒激光的脉宽和重频不一样,但对相机的干扰效果基本一致.其中,激光重频不能太低,其脉冲间隔要求小于探测器积分时间,以确保在探测器积分时间内至少有一个脉冲照射到探测器上.

#### 2.4 与激光对凝视相机干扰差异分析

凝视相机采用面阵 CCD 探测器,与推扫相机不同,可以不依赖平台的运动对目标成像.

通过激光干扰实验,波长  $0.532 \mu\text{m}$  高重频激光对凝视相机的干扰现象为:

1) 在照射激光功率较低时,像面上出现局部亮斑.典型干扰图像如图6(a)所示.

2) 增大照射激光功率,亮斑扩大,随着照射激光功率进一步增加,整幅图像将完全变成白色.典型干扰图像如图6(b)、图6(c)所示.

3) 若进一步增大照射激光功率,整幅图像由白色变成黑色,出现图像反转现象,在没有激光干扰时相机恢复正常成像.典型干扰图像如图6(d)所示.

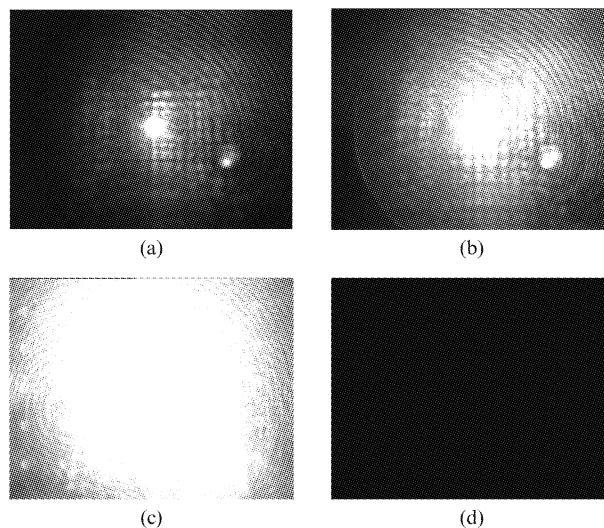


图6 激光对凝视相机干扰图

Fig. 6 Diagram of laser jamming to gaze camera

由上述实验可以看出,激光对推扫相机和对凝视相机的干扰图像存在一定差异.主要表现为:激光对推扫相机的干扰为条带状,激光对凝视相机的干扰为圆环状,在照射激光功率较强时,都存在图像反转变黑现象.

照射激光信号经凝视相机光学系统会聚后在面阵 CCD 探测器焦平面上形成一个微小光斑.激光光斑信号经 CCD 探测器形成光生电荷,随着照射激光信号的增强,光生电荷将直接照射像元处的电荷储存势阱充满后就会溢出至周围其它像元的电荷储存势阱中,在输出图像中就形成了逐渐增大的亮斑.

当照射激光光强特别大时,造成 CCD 复位电平出现紊乱,使其输出电平增大,这时信号电平减去复位电平变小甚至为零,面阵 CCD 输出信号就变为黑屏.

通过上述分析可知:尽管激光对推扫相机和对凝视相机的干扰图像存在差异,但其干扰机理基本相同,根本原因是多余光生电荷的溢出和复位电平被扰乱.

通过实验可知:无论是推扫相机还是凝视相机,只要激光进入相机视场就会对相机造成干扰,推扫只是一种成像方式,当推扫平台使相机进入激光照射区域就会产生激光干扰.

### 3 结论

从激光对推扫相机干扰实验入手,获得了干扰图像,从线阵 CCD 探测器的结构和图像处理层面出发,分析了激光对推扫相机的干扰机理,通过对实验

数据对比和数学拟合,分析了影响推扫相机图像干扰面积的主要因素,并与激光对凝视相机干扰的差异进行了分析对比。

通过实验和理论分析可得出以下结论:

1) 在照射激光功率较低时,像面上出现局部饱和亮斑。随着照射激光功率增加,出现白色串扰线和黑色反转线,图像中形成白色串扰线和黑色反转线混杂的干扰带。

2) 局部饱和亮斑和白色串扰线形成的原因是:激光信号经 CCD 探测器形成大量光生电荷,光生电荷溢出至其它像元的电荷储存势阱中,以及通过电荷转移通道溢出到其它像元的移出信号中所致。黑色反转线的形成原因是:当照射激光光强特别大时,光电荷积累太多,造成 CCD 复位电平出现紊乱,致使其输出电平增大,信号电平减去出现紊乱的复位电平反而变小,使 CCD 输出信号出现了黑色反转线。

3) 在推扫相机 CCD 探测器积分时间、转台转速设置一致及激光波长相同的情况下,影响激光对推扫相机图像干扰面积的主要因素是相机入瞳激光功率,与激光脉宽和重频关系不大(脉冲间隔要求小于探测器积分时间)。

4) 激光对推扫相机和对凝视相机的干扰机理基本相同,都是由激光照射信号产生的多余光生电荷溢出和探测器复位电平被扰乱造成的。

## References

- [1] SHEN Hong-Bin, SHEN Xue-Ju, ZHOU Bing, *et al.* Experimental study of 532 nm pulsed laser irradiating CCD [J]. *High Power Laser and Particle Beams*. (沈洪斌,沈学举,周兵,等. 532 nm 脉冲激光辐照 CCD 实验研究. *强激光与粒子束*), 2009, **21**(10): 1449 - 1454.
- [2] LIN Jun-Yang, SHU Rong, HUANG Geng-Hua, *et al.* Study on Threshold of Laser Damage CCD and CMOS M Age Sensors[J]. *J Infrared Millin. Waves*. (林均仰,舒嵘,黄庚华,等. 激光对 CCD 及 CMOS 图像传感器的损伤阈值研究. *红外与毫米波学报*), 2008, **27**(6): 475 - 478.
- [3] JIANG Ji-Jun, LUO Fu, CHEN Jian-Guo. Research on femtosecond laser induced damage to CCD[J]. *High Power Laser and Particle Beams*. (江继军,罗福,陈建国. CCD 在 fs 激光辐照下的损伤研究. *强激光与粒子束*), 2005, **17**(4): 515 - 517.
- [4] GUO Shao-Feng, CHENG Xiang-Ai, FU Xi-Quan, *et al.* Failure of array CCD irradiated by high-repetitive femto-second laser. *High Power Laser and Particle Beams*. (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. *强激光与粒子束*), 2007, **19**(17): 1783 - 1786.
- [5] ZHANG Da-Yong, ZHAO Jian-Heng, WANG Wei-Ping, *et al.* Study of disturbance to visible-light array CCD detectors irradiated by 1.319  $\mu\text{m}$  CW YAG laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*. (张大勇,赵剑衡,王伟平,等. 1.319  $\mu\text{m}$  连续 YAG 激光束对可见光面阵 CCD 系统的干扰研究. *强激光与粒子束*), 2003, **15**(11): 1050 - 1052.
- [6] LI Wen-Yu, WANG Jin-Bao, CHENG Xiang-Ai, *et al.* New analysis on laser-induced damage mechanism of array CCD device[J]. *High Power Laser and Particle Beams*. (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. *强激光与粒子束*), 2005, **17**(10): 1457 - 1459.
- [7] QIU Dong-Dong, ZHANG Zhen, WANG Rui, *et al.* Mechanism research of pulsed-laser induced damage to CCD imaging devices[J]. *Acta Optica Sinica*. (邱冬冬,张震,王睿,等. 脉冲激光对 CCD 成像器件的破坏机理研究. *光子学报*), 2011, **32**(2): 21 - 25.
- [8] LIAO Hai, SUN Nian-Chun, FENG Guo-Ying, *et al.* Experimental study on 532 nm laser-induced failure of array and linear CCD[J]. *LASER TECHNOLOGY*. (廖海,孙年春,冯国英,等. 532 nm 激光对面阵和线阵 CCD 损伤效应实验研究. *激光技术*), 2010, **34**(5): 643 - 646.
- [9] ZHANG Zhen. Laser-induced dazzling phenomena in visible light CCD and their mechanism[D]. Changsha: *Graduate School of National University of Defense Technology*. (张震. 可见光 CCD 的激光致眩现象与机理研究. 长沙: 国防科学技术大学), 2010.
- [10] ZHU Zhi-Wu, ZHANG Zhen, CHENG Xiang-Ai, *et al.* Damage phenomenon and probability of CCD detectors under single-laser-pulse irradiation[J]. *Infrared and Laser Engineering*. (朱志武,张震,程湘爱,等. 单脉冲激光对 CCD 探测器的硬损伤及损伤概率. *红外与激光工程*), 2013, **42**(1): 113 - 118.