

·激光技术·

强光作用下光电成像系统饱和效应研究

杨海波¹, 官上洪¹, 邵 铭², 刘小虎²

(1. 光电信息控制和安全技术重点实验室, 天津 300308; 2. 光电对抗测试评估技术重点实验室, 河南 洛阳 471000)

摘要:通过强光辐照光电成像系统实验研究, 得到了饱和像元数与入射光强、光学系统参数、像元饱和和阈值等参数之间的变化规律, 并利用光学系统点扩展函数(PSF)进行了理论验证。结果表明, 饱和像元主要由衍射效应引起。推导了饱和像元数与入射光强、波长、光学系统参数、像元饱和和阈值等参数之间的关系。

关键词:饱和效应; 饱和像元数; 衍射效应; PSF

中图分类号: TN206

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2018)-03-0021-04

Study of Saturation Effect on Electro-optical Imaging System Induced by Intense Light

YANG Hai-bo¹, GUAN Shang-hong¹, SHAO Ming², LIU Xiao-hu²

(1. Science and Technology on Electro-Optical Information Security Control Laboratory, Tianjin 300308, China;

2. Key Laboratory of Electro-Optical Countermeasures Test & Evaluation Technology, Luoyang 471000, China)

Abstract: Based on the experimental research on the electro-optical imaging system induced by intense light, the various rules of the parameters such as saturated pixels, the intensity of incidence, the parameters of the optical system and the saturated threshold of pixels are obtained. And the point spread function (PSF) of the optical system is used to verify theoretically. The result shows that saturated pixels have been made by diffraction effect. The relationships between saturated pixels and the intensity of incidence, wavelength, the parameters of the optical system, the saturated threshold of pixels are derived.

Key words: saturation effect; saturation pixel; diffraction effect; point spread function (PSF)

光电成像器件集光电转换、电荷存贮及电荷传输等功能于一体, 具有体积小、重量轻、灵敏度与分辨率高、效费比高等优点, 被广泛用于航空航天、测绘测量、摄像和监控等多个领域^[1-6]。

由于激光具有亮度高、方向性好等优点, 极易影响光电成像探测器系统的正常工作, 根据激光对光电探测器的破坏程度, 通常分为软损伤和硬损伤两种^[2]。随着激光在军事方面应用的不断增多, 激光对光电成像探测器的损伤研究且具有重要意义, 国内外在激光辐照光电成像探测器方面开展了大量工作^[7]。

由于激光输出波长有限, 在研究波长对饱和效

应影响方面存在波长数据不足等缺点, 采用了波长连续可调的强光作为辐射源, 开展强光辐照光电成像系统实验。给出了一种光电成像探测器饱和和光斑面积随着入射光强增加而扩大的理论解释, 并获得了饱和像元数与入射光强、波长、光学系统参数和饱和和阈值等参数之间的关系。

1 实验研究

1.1 实验布局

实验装置示意图如图 1 所示。

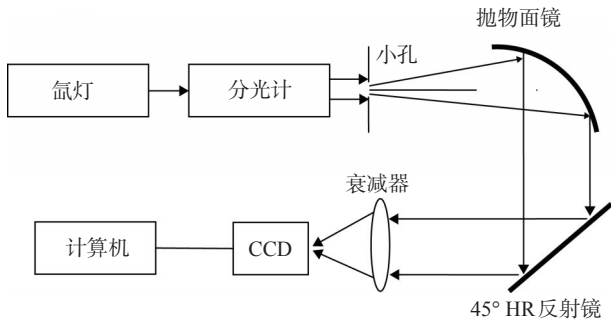


图1 实验装置示意图

选用 Imperx 公司 Bobcat 系列 ICL-B0620 型 CCD 相机作为实验对象,相机芯片为 KAI-0340D,尺寸为 1/3",该 CCD 相机具有积分时间可调、预放、模拟放大、数字放大可控及 8~12 bit 数字输出等特点。

实验中选用了 3 套不同参数的光学镜头,分别是:焦距为 8 mm, $F/\#$ 为 1.4~16;焦距为 16 mm, $F/\#$ 为 1.4~16;焦距为 50 mm, $F/\#$ 为 1.8~16。

由高压氙灯、单色仪、针孔、离轴抛物面镜组合获得 400~1 100 nm 波段范围任意波长的平行强光,衰减片由渐变滤光片和透过率为 1/8 中性密度滤光片组成。

实验选用了 500 nm、600 nm、800 nm 的波长开展实验。由于氙灯经过单色仪分光后的光强较弱,很难利用功率计等设备精确测量其输出功率值,因此,实验中采用相对光强度量的办法进行光功率度量。以焦距 50 mm, $F/\#$ 为 1.8 时使探测器输出像元恰好达到饱和时的入射光功率密度作为阈值光功率密度,可用 $I_{th}(\lambda)$ 表示,保持渐变滤光片位置不动,减少中性衰减片的数量为 N 时,则入射光强度为 $8^N I_{th}$ 。

1.2 实验结果及分析

图 2 为波长 500 nm、焦距 50 mm、 $F/\#=4$ 时,入射光功率密度按照八倍逐渐增强时探测器输出的数字图像,更换另外两套光学镜头时,均获得了类似的实验现象。

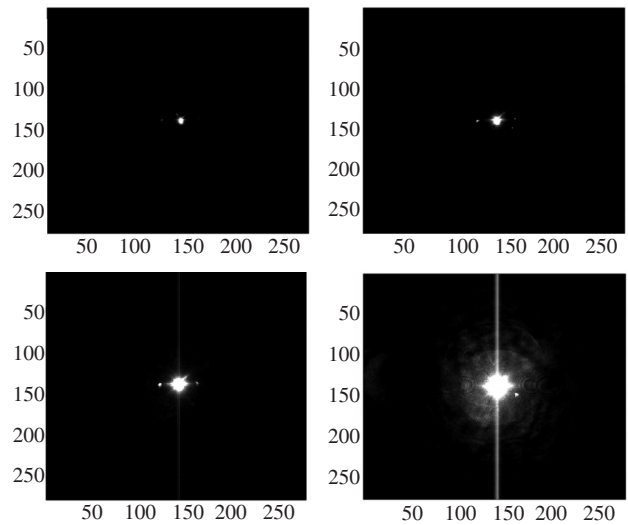
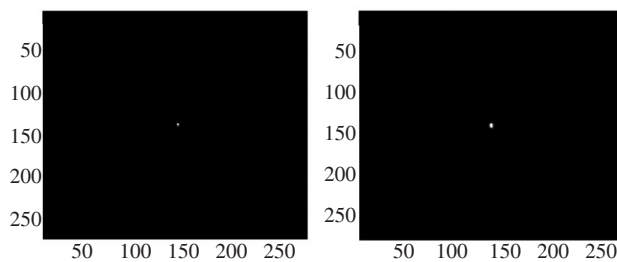


图2 CCD的输出图像

从图 2 中可以看出,随着入射光强增强,探测器饱和面积逐渐扩大,当光强增加到一定程度时,会出现垂直方向的串扰亮线,其产生原因主要由 CCD 探测器读出电路时序造成^[8]。实验中只关注探测器饱和光斑面积与入射光强、光学系统参数、像元饱和阈值等参数的关系,故不考虑串扰亮线对饱和像元数的贡献。

探测器的像元尺寸为 $7.4 \mu\text{m} \times 7.4 \mu\text{m}$,当光斑小于 100 个像元时,像元数的微小抖动均会引起测量的精度。因此,以饱和像元数大于 100 个时进行数据统计获得的结果较为准确,

图 3 为扣除串扰亮线后,入射激光强度与饱和像元数之间的关系曲线,点为实测数据,直线为线性拟合曲线(以大于 100 个饱和像元的数据进行拟合)。

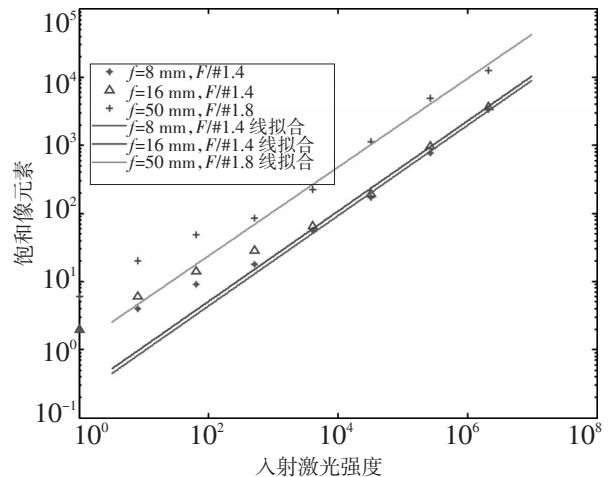


图3 不同参数光学系统入射激光强度与饱和像元数的关系曲线

当入射光强与饱和像元数均取完对数后发现,二者之间近似成线性关系,如图3所示。采用最小二乘法拟合获得的斜率分别为:0.663、0.662、0.651,截距分别为-0.69、-0.62、0.07。可以看出,实验获得的几组曲线接近平行,相同 $F/\#$ 时焦距越大,曲线截距越大。

根据 CCD 工作原理可以知道,改变探测器的积分时间,相当于改变探测器的饱和阈值。在 CCD 不同积分时间条件下,可以获得类似的关系曲线,积分时间越长,则截距越大。因此,可以看出,探测器的饱和面积与光学系统参数、入射光强度、探测器饱和阈值等有关。

2 理论分析

2.1 光学系统 PSF 对饱和效应影响仿真计算

为了研究光学系统 PSF 对探测器饱和效应的影响,利用 ZEMAX 软件设计了两套可见光光学系统,其参数分别是焦距 50 mm、 $F/\#$ 为 4~16 可变,焦距 30~120 mm、 $F/\#$ 为 3.8 的可变焦光学系统。通过 FFT 算法,分别计算不同参数条件下的 PSF 值,则探测器位置上的光强分布 $I(x, y)$ 可以表示为

$$I(x, y) = \pi R^2 \times \text{PSF} \times E \quad (1)$$

式中, x, y 为焦面位置坐标; PSF 为该光学系统的点扩展函数; E 为入射光强; R 为入瞳半径。

为了模拟探测器各个像元接收到光强度,需要按照像元大小进行光强度积分,此时各像元接收到光强分布可以用 $I(m, n)$ 表示

$$I(m, n) = \iint_{\Delta A} I(x, y) dx dy \quad (2)$$

式中, m, n 为探测器的位置坐标, ΔA 为像元面积。

通过设定探测器饱和阈值 I_m , 同时改变入射光强度 E , 便可以对探测器表面超过阈值的光斑进行模拟,图4为相同条件下获得的模拟图像(上图)与真实图像(下图)对比图。

通过图4比较可以看出,若将探测器自身串扰带来的亮线扣除后,模拟结果与实验结果基本相同。

同样,对超过探测器饱和阈值的像元数与入射光强度之间的关系进行统计,统计结果如图5所示。

可以看出,探测器饱和面积与入射光强取对数后,二者近似成线性关系,其斜率为 0.65~0.67 之间,不同参数条件下的关系曲线近似平行,这与实验结

果吻合。因此,光学系统的 PSF 是引起探测器饱和面积扩大的原因。

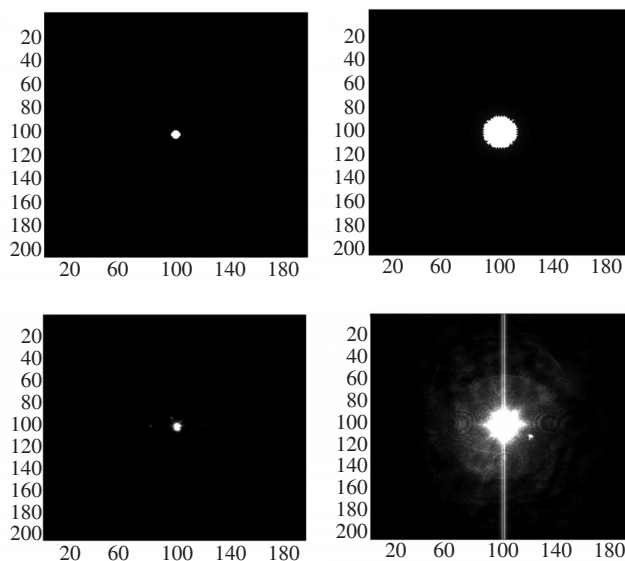


图4 超过阈值的光斑模拟与实验对比图

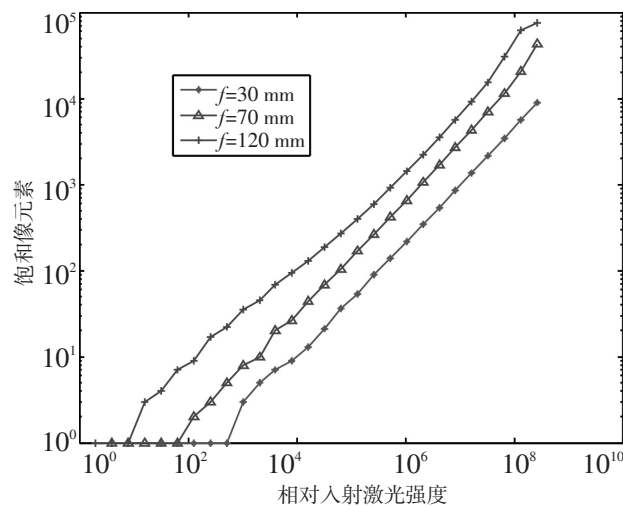


图5 不同焦距条件下饱和像元数与相对入射光强的关系

光学系统在焦面上产生的 PSF 由衍射和像差引起。正常成像光学系统的像差通常都很小,对饱和像元的贡献可以忽略不计。因此光学系统衍射效应成为成像探测器饱和面积扩大的主要原因。

2.2 基于圆孔夫朗和费衍射理论推导

平行光经过圆孔后在无穷远处的衍射满足夫朗和费衍射条件,其在无穷远的光强密度角分布可以用公式(3)^[10-11]表述

$$E(\omega) = \frac{E\pi^2 R^4}{\lambda^2 f^2} \left[\frac{2J_1(kR\omega)}{kR\omega} \right]^2 \quad (3)$$

对于无像差理想光学系统近轴条件,其衍射规律与夫朗和费衍射近似,其点扩展函数在焦面上光强密度分布可以将位置分布用 $r = \omega f$ 代入式(3)获得,轴上无像差光学系统在焦面位置上的光强密度分布为

$$E(r) = \frac{E\pi^2 R^4}{\lambda^2 f^2} \left(\frac{2J_1\left(\frac{kRr}{f}\right)}{kR\frac{r}{f}} \right)^2 = \frac{E\pi^2 f^2}{16\lambda^2 f\#^4} \left(\frac{2J_1\left(\frac{\pi r}{\lambda f\#}\right)}{\frac{\pi r}{\lambda f\#}} \right)^2 \quad (4)$$

式中, E 为入瞳面光强度密度; R 为入瞳半径, λ 为入射光波长; f 为系统焦距; $f\#$ 为光学系统 F 数, J_1 为一阶贝塞尔函数; r 为考察位置距离焦面光斑中心的距离。

面阵探测器像元尺寸在 $10 \mu\text{m}$ 量级,当出现多个像元出现饱和时, $\frac{\pi r}{\lambda f\#} \gg 1$, 贝塞尔函数 $J_1(x)$ 的 $x \rightarrow \infty$ 的条件满足,因此 $J_1(x) \rightarrow \sqrt{\frac{2}{\pi x}} \cos\left(x - \frac{3\pi}{4}\right)$ ^[12-13], 则式(4)可以改写为

$$E(r) = T(r) \left(1 + \cos\left(\frac{2\pi r}{\lambda f\#} - \frac{3\pi}{2}\right) \right) \quad (5)$$

式(5)中, $\left(\cos\left(\frac{2\pi r}{\lambda f\#} - \frac{3\pi}{2}\right)\right)$ 为震荡项^[12]; $T(r) = \frac{E\lambda f^2}{4f\#\pi^2 r^3}$ 为 $I(r)$ 分布的包络线。像元面积内 S_0 的光强在作面积积分时需要考虑平均效果,通常像元尺寸远大于震荡项震荡周期的距离,因此用 $\frac{T(r)}{2}$ 描述焦面光强分布是合理的。

假设探测器的饱和光强密度阈值为 E_{th} , 令 $\frac{T(r)}{2} = E_{th}$, 圆孔衍射的光斑为圆形,则饱和半径 r 为

$$r = \left(\frac{E\lambda f^2}{8f\#\pi^2 E_{th}} \right)^{1/3} \quad (6)$$

同样,饱和面积 S 为

$$S = \left(\frac{E\lambda f^2}{8f\#\pi^{1/2} E_{th}} \right)^{2/3} \quad (7)$$

两边同时取对数得到

$$\lg S = \frac{2}{3} \lg(\lambda E) + \frac{2}{3} \lg\left(\frac{f^2}{f\#}\right) - \frac{2}{3} \lg E_{th} - 0.7678 \quad (8)$$

从式(8)可以看到,探测器像元饱和面积与入射光参数、光学系统参数、探测器饱和阈值等相关。可以得出以下结论,(1)饱和面积与入射光强度之间存在 $2/3$ 的指数关系,与获得的实验结果吻合;(2)光学系统焦距 f 、 $F/\#$ 均会对饱和面积造成影响,焦距的影响比 $F/\#$ 影响更大,与模拟结果和实验结果一致;(3)探测器的阈值也会影响探测器的饱和面积,阈值越低饱和面积越大,与实验规律一致。

3 结论

从实验和理论上对光电成像系统饱和效应进行了研究。研究表明,光学系统衍射效应是引起探测器饱和面积扩大的主要原因,其饱和面积与入射光强、波长、光学系统参数和饱和阈值等参数密切相关。文中的理论推导是从无像差理想光学系统中获得,对于有像差光学成像系统的饱和效应还需要进一步研究。

参考文献

- [1] 王庆有.CCD应用技术[M].天津:天津大学出版社,2000.
- [2] Rozmus W, Tikhonchuk V T. Skin effect and interaction of short laser pulses with dense plasmas[J]. Phys Rev A, 1990, 42(12).
- [3] Gamaly E G, Rode A V, Luther-Davis B. Ablation of solids by femto-second lasers: ablation mechanism and ablation thresholds for metals and dielectrics[J]. Physics of Plasma, 2002, 9(3).
- [4] 周建民,付有余,郭劲,等.脉冲激光对 CCD 的软损伤技术研究[J]. 激光杂志,2005,26(2):20-21.
- [5] 黄绍艳,张永生,唐本奇,等.500fs 超短脉冲激光对 CCD 探测器的破坏效应[J]. 强激光与粒子束,2005,17(10):1445-1448.
- [6] 王世勇,付有余,郭劲.激光辐照面阵探测器系统局部的干扰效应[J]. 半导体光电,2002 23(2):106-108.
- [7] 钟海荣,陆启生,文铁峰,等.激光辐射 CCD 的破坏机理分析[J]. 强激光与离子束,1998,10(4):537-542.
- [8] 张震,江天,程湘爱,等.CCD 强光串扰效应的串扰线缺口现象及其机制[J]. 强激光与粒子束,2010,7.
- [9] James P L, Chang W C, Constantine N A, et al. Monte Carlo simulation of the photoelectron crosstalk in silicon imaging devices[J]. IEEE Trans on Computer-Aided Design, 1985.

(下转第 78 页)

表1 检测结果记录表

距离 设定 /km	发射信 号间隔 /ms	测试结果	
		从激光发射信号到输出 模拟回波信号的时间/ μ s	距离换算/m
0.6	1	3.999 3	599.895
	50	40.000 1	6 000.015
6	1	399.999 7	59 999.955
	50	3.999 9	599.985
60	1	39.999 9	5 999.985
	50	4 000.000 2	60 000.030

6 结 论

从研究多脉冲激光测距机的实现原理出发,介绍了实现多脉冲激光测距机重要指标检测的方法,并对信号时序识别、激光信号脉宽测量、高精度延时器和激光器功率稳定度等关键技术软硬件的实现进行了描述。针对该方法设计了分组模拟测试,并对实验结果进行了记录和分析,实验证明该方法在实际检测过程中易于操作、自动化程度高,并且拥有较高的测量精度,有效解决了传统检测对测试场地要求高、过程复杂且受大气能见度影响的

问题。

参考文献

- [1] WANG Yang, WANG Qian-qian. The application of lidar in detecting the space debris[C]//Proc of SPIE, 2009.
- [2] 龙腾宇,黄民双,孙丽妍,等.单脉冲互相关累积法在激光脉冲远程测距中的应用[J].北京石油化工学院学报, 2013, 21(3).
- [3] 倪旭翔,胡凯.脉冲串互相关方法在远程激光测距中的应用[J].光学学报, 2012, 32(11).
- [4] 谭显裕.脉冲激光测仪灵敏度与消光比研究[J].红外与激光技术, 1990, 17(2).
- [5] 羊毅,陆祖康,倪旭翔,等.激光测距机测程指标的拟定及测试方法电光与控制[J]. 2002(2).
- [6] 谭浩强.C程序设计[M].北京:清华大学出版社, 2003.
- [7] 付小宁.光电探测技术与系统[M].北京:电子工业出版社, 2010.
- [8] 郝晓剑.光电探测技术与应用[M].北京:国防工业出版社, 2009.
- [9] 邢刚.基于CPLD的多目标脉冲激光测距系统的设计与实现[J].激光与红外, 2010.
- [10] 张春风,羊毅,刘春华.基于多脉冲的机载远程激光测距信号处理算法[J].电光与控制, 2010.
- [10] Born & Wolf.光学原理[M].北京:电子工业出版社, 2009, 10.
- [11] 麦伟麟.光学传递函数及其数理基础[M].北京:国防工业出版社, 1979, 3.
- [12] 孙可,江厚满,程湘爱.强光辐照下主镜表面散射引起的视场内杂光分布[J].光学精密工程, 2011, 19(2): 493-499.
- [13] 梁昆淼.数学物理方程[M].北京:高等教育出版社, 2004, 2.
- [7] 孙即祥.图像处理[M].北京:科学出版社, 2004.
- [8] 徐正光,鲍东来,张利欣.基于递归的二值图像连通域像素标记算法[J].计算机工程, 2006, 32(24): 186-188.
- [9] 刘杨,赵香菊,张蕾.面向遥感图像处理与展示的多语言构件设计[J].河南大学学报(自然科学版), 2016, 46(4): 472-481.
- [10] 李蓉,邹昆,马慧.基于S3C2440处理器系统的数字图像处理技术和嵌入式技术结合机制[J].现代电子技术, 2016, 39(23): 55-57.

(上接第24页)

(上接第41页)