

doi:10.3788/gzxb20134207.0832

# 基于小波能量和光斑尺寸的干扰图像尺度分析

吴云龙<sup>1</sup>, 邵立<sup>1,2</sup>, 张恺<sup>2</sup>, 李锋<sup>1</sup>, 孙晓泉<sup>1</sup>

(1 脉冲功率激光技术国家重点实验室, 合肥 230037)

(2 电子工程学院 光电系 602 室, 合肥 230037)

**摘 要:**介绍了激光干扰对 CCD 成像系统的影响,从影响光电成像系统目标检测性能的角度阐述了激光干扰图像与背景杂波的相似性.针对激光干扰图像的频率特性,利用小波分析在图像处理中的优势,结合机器视觉中背景杂波的量化尺度,提出了基于小波能量和光斑尺寸的综合图像尺度.对典型激光干扰图像的小波分析显示,随着激光干扰功率的增大,干扰图像中的低频分量和高频分量会同时增加,图像中的光斑可被看作是低频分量,光斑周围“斑驳状”的散斑是高频分量,类似于盐噪音.激光视场内干扰实验及数值计算表明:激光干扰会降低 Otsu 算法分割准确度,增加相关检测虚警概率,该尺度将干扰图像的高频分量和低频分量结合起来,同时克服了单一光斑尺度和小波能量尺度的局限性,能够较好地评估视场内激光干扰 CCD 成像系统的效果.

**关键词:**激光干扰;频率特性;小波能量;光斑尺寸;评估

中图分类号:TN977

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2013)07-0832-7

## Image Metric Analysis of Laser Jamming Effect Based on Wavelet Energy and Spot Size

WU Yun-long<sup>1</sup>, SHAO Li<sup>2</sup>, ZHANG Kai<sup>2</sup>, LI Feng<sup>1</sup>, SUN Xiao-quan<sup>1</sup>

(1 State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Hefei 230037, China)

(2 602 Lab. of Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

**Abstract:** The influence of laser jamming on CCD imaging system is introduced. The similarity between laser jamming image and background clutter is illuminated in the view of their influence on electro-optical imaging detection system. Aiming at the frequency characteristic of laser jamming image and combining with background clutter metrics in machine vision, a comprehensive image metric for describing laser jamming effect is proposed by taking advantage of the predominance of wavelet analysis, based on wavelet energy and spot size. The wavelet analysis on typical laser jamming images indicates that the approximation coefficients and detail coefficients will both increase with the raise of laser power; the laser spot in jamming image can be regarded as the approximation coefficients, and the laser speckle around the spot can be seen as detail coefficients, which is similar to the salt noise. Laser jamming experiment in the field of view and simulative calculation show that laser jamming can reduce the segmentation accuracy of Otsu method, and raise the false alarm probability of correlation method. The metric can avoid the weaknesses of spot metric and wavelet energy metric. Hence, it is able to reflect the performance of laser jamming on CCD imaging system in the field of view properly.

**Key words:** Laser jamming; Frequency characteristic; Wavelet energy; Laser spot size; Evaluation

基金项目:重点实验室基金(No. 13J1003)和光电信息控制和安全技术重点实验室基金(No. 20100713-003)资助

第一作者:吴云龙(1988-),男,硕士研究生,主要研究方向为激光与物质相互作用技术及干扰评估方面研究. Email:jackwu1225@126.com

导师(通讯作者):孙晓泉(1962-),男,教授,博士,主要研究方向为光学技术. Email:sunxq@ustc.com

收稿日期:2013-01-28;录用日期:2013-04-17

## 0 引言

电荷耦合器件 CCD 具有体积小、重量轻、灵敏度与分辨率高等特点,作为电视摄像机、图像导引头的关键部件广泛地应用于侦查、制导、摄像、监控等各个领域<sup>[1]</sup>.但在实际工作过程中,以 CCD 图像探测器为核心部件的各种光电设备很容易受到激光的干扰和破坏,导致成像系统对目标的检测性能受到不同程度的影响.因此,研究激光干扰如何影响 CCD 成像系统的检测性能以及定量评估干扰的效果具有重要的意义.目前,对于探测器的激光干扰效果评估研究的公开文献大致分为采用模糊综合评估方法、相关函数方法、基于跟踪误差的方法以及基于图像质量评价方法等<sup>[2-3]</sup>.本文充分利用小波分析在图像处理中的优势,从激光干扰 CCD 成像质量的角度来研究视场内激光对 CCD 干扰的效果评估.

## 1 激光干扰对 CCD 成像系统的影响

CCD 探测器受到激光干扰后,其所成图像会发生一定的变化.对于视场内的干扰,当到达 CCD 光敏面的光强达到一定阈值强度时,CCD 被光照射的区域会出现局部饱和,当光照足够强时,CCD 将在电荷传输方向出现亮线,即光饱和串扰.继续增强光强时,亮线不断加宽,甚至整个光敏区域处于饱和<sup>[4-5]</sup>.视场外激光对 CCD 探测器形成干扰的成因较复杂,主要包括激光通过光学系统时的衍射效应和散斑效应.当入射激光足够强时,多点散射的光线在 CCD 表面上相干叠加形成散斑,使图像背景趋于复杂.无论是视场内干扰还是视场外干扰,干扰后所成图像均会对成像系统的目标检测性能造成一定的影响,干扰越严重,成像系统对目标的检测就越困难.另一方面,光电图像中的背景杂波会不同程度的降低 CCD 的成像质量,这些“与目标类似的物体”会大大降低各种目标自动探测算法的性能,从而使目标检测过程受到干扰.因此,从影响 CCD 成像系统目标检测性能的角度来看,激光干扰图像与背景杂波相类似,可以尝试从杂波角度对激光干扰图像进行分析.

## 2 激光干扰 CCD 效果评估方法

### 2.1 激光干扰图像的频率特性

目前,机器视觉性能模型中主要采用基于背景功率谱密度(Power Spectral Density, PSD)分布模型的方法来量化描述背景杂波,最常用的 PSD 模型有维纳型、高斯-马尔科夫型以及巴特沃斯型.维纳型没有考虑到背景杂波的二维空间分布;高斯-马尔

科夫型适用于杂波不太严重的情况;巴特沃斯型则易受到周期噪音的影响<sup>[6-7]</sup>.Groves 等人<sup>[8]</sup>提出了基于小波变换的杂波尺度,将小波变换理论应用到机器视觉系统的杂波量化中,其优势主要体现在:小波变换提供一种既可以空间分离感兴趣的区域,又可以对感兴趣的空间频率进行分析的方法.另外,小波变换很好地克服了周期噪音的影响,并同时保留局部信息和全局信息<sup>[9]</sup>.

选取两幅典型视场内激光干扰 CCD 的图像如图 1,图 1(a)是视场内功率为  $40 \mu\text{W}$  的连续激光干扰图像,图 1(b)是视场内功率为  $130 \mu\text{W}$  的连续激光干扰图像.

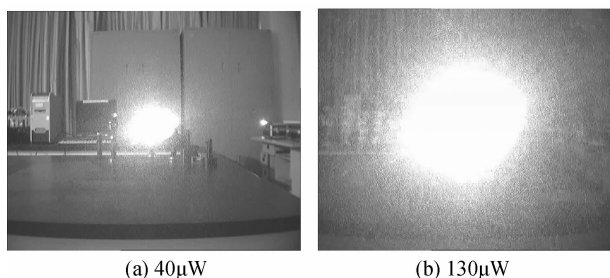


图 1 视场内激光干扰 CCD 图像

Fig. 1 Laser jamming images in the field of view

分别对图 1(a)、(b)进行二级小波分解,提取各自图像分解后第二层低频和高频系数,如图 2、图 3 所示.

由图 2、图 3 可以看出,激光在视场内辐照在 CCD 上,其所成图像中,激光的饱和光斑可被看成是低频分量,且光斑尺寸随着入射激光功率的增加而增大;同时,在激光干扰图像上,其光斑周围呈“斑驳状”的散斑是高频分量,可被看作是数字图像中的盐噪音,且其系数随着入射激光功率的增大而增大.

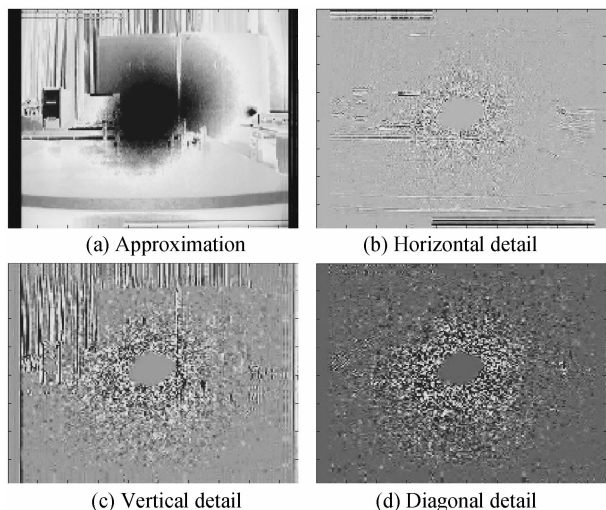


图 2 图 1(a)对应的第二层小波分解低频、水平、垂直、对角系数

Fig. 2 The approximation and detail coefficients on decomposition level two for Fig. 1(a)

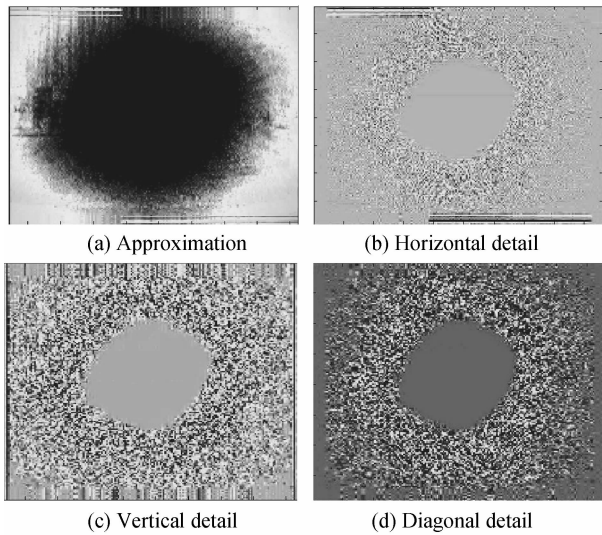


图3 图1(b)对应的第二层小波分解低频、水平、垂直、对角系数

Fig. 3 The approximation and detail coefficients on decomposition level two for Fig. 1(b)

因此,本文针对激光干扰图像的特点,将干扰图像中的低频和高频分量综合考虑,提出了基于小波能量和光斑尺寸的图像尺度,用于评估激光干扰对 CCD 成像系统目标检测性能的影响。

## 2.2 基于小波能量和光斑尺寸的图像尺度

典型的基于小波变换的杂波尺度模型如下.首先对图像进行三级小波分解(这里采用 bior6.8 小波基函数),得到水平边缘子带、垂直边缘子带以及对角边缘子带图像,分别求各自方向的小波能量,然后求得平均小波能量,求解小波能量的表达式为<sup>[8]</sup>

$$E = \frac{1}{MN} \sum_m \sum_n (\omega(m, n))^2 \quad (1)$$

式中: $\omega(m, n)$ 为小波图像 $(m, n)$ 处的强度; $M, N$ 为图像的维数。

广义的背景杂波定义为图像中除掉目标和系统噪声后所剩余的部分.在小波能量尺度的计算中,水平分量不纳入计算,因为水平高频分量中包含由于探测器扫描而产生的水平噪声和在图像数字化过程中产生的视场噪声<sup>[8]</sup>,相应的小波能量尺度为

$$C = \sqrt{E} \quad (2)$$

求得垂直和对角方向的小波能量尺度  $C_v$  和  $C_d$ ,并对小波能量函数 wenergy2 提供的垂直和对角高频系数能量百分比进行归一化,求得各自的权重系数  $f_v$  和  $f_d$ ,对加权结果进行取对数运算,最后得到平均的小波能量尺度为

$$C_{ave} = \log_{10}(f_v \cdot C_v + f_d \cdot C_d) \quad (3)$$

对 CCD 采集得到的激光干扰图像进行滤波处理,利用 Otsu 自适应阈值分割技术提取干扰图像的边缘,对预处理后的图像进行数学形态学运算,通过膨胀、填充及开运算可以得到仅含光斑在内的二

值图像<sup>[9-11]</sup>.最后,对得到的二值图像进行数学统计,得到光斑尺寸为

$$D = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N |g(m, n) = 1| \quad (4)$$

式中  $g(m, n)$ 为二值图像 $(m, n)$ 处的强度; $M, N$ 为图像的维数.对  $D$  取对数运算,得到光斑尺度为

$$D_c = \log_{10} D \quad (5)$$

在激光干扰 CCD 的图像中,随着入射功率的增加,干扰图像的高频分量和低频分量都会相应增加,因此,有必要将小波能量尺度  $C_{ave}$  和光斑尺度  $D_c$  综合考虑,得到图像尺度  $DC$ ,即

$$DC = C_{ave} \cdot D_c \quad (6)$$

由式(6)可知,当激光干扰较轻时,图像的小波能量值较小,则  $C_{ave}$  值较小,光斑尺寸较小,得到的  $D_c$  值也较小,计算得到的  $DC$  值较小;当激光干扰严重时,则图像的高频分量明显增加,小波能量值较大,则  $C_{ave}$  值较大,与此同时,图像中的低频分量也显著增大,则光斑尺度  $D_c$  值较大,计算得到的  $DC$  值较大.因此, $DC$  尺度可以用来评估激光干扰 CCD 效果,即干扰较轻时, $DC$  值较小,干扰效果差;反之, $DC$  值较大,干扰效果好。

## 3 实验结果与分析

实验中采用连续激光对 CCD 成像系统进行干扰,装置如图 4.其中,激光器为 632.8 nm 的 He-Ne 连续激光器;CCD 器件为 CAM-590B 型 1/3in 黑白摄像机<sup>[12-13]</sup>.衰减片用来衰减到达 CCD 表面激光的功率;功率计用来检测激光输出的功率.实验中,保持 CCD 光轴与激光束对准,保证激光在视场内对 CCD 进行干扰。

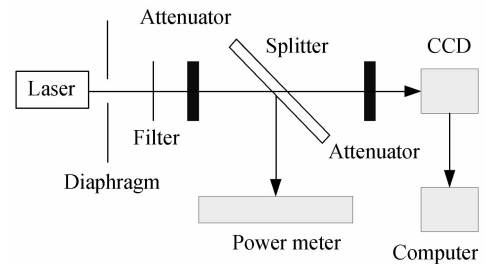


图4 视场内激光干扰 CCD 实验装置  
Fig. 4 Experimental set-up of laser jamming CCD in the field of view

原始图像及激光视场内干扰所采集的图像如图 5.图 5(a)~(e)分别代表原始图像以及功率为  $6.9 \mu\text{W}$ 、 $13.7 \mu\text{W}$ 、 $22.3 \mu\text{W}$ 、 $34.8 \mu\text{W}$ 、 $50 \mu\text{W}$ 、 $76 \mu\text{W}$ 、 $124 \mu\text{W}$  的激光干扰下,CCD 探测器所采集到的图像.从图中可以明显看到,随着激光功率的增大,光斑尺寸不断变大,光斑周围的“斑驳状”的散斑不断增多.对图 5(b)~(h)进行边缘提取和形态学运算,得到仅含光斑在内的二值图像如图 6(a)~(g).

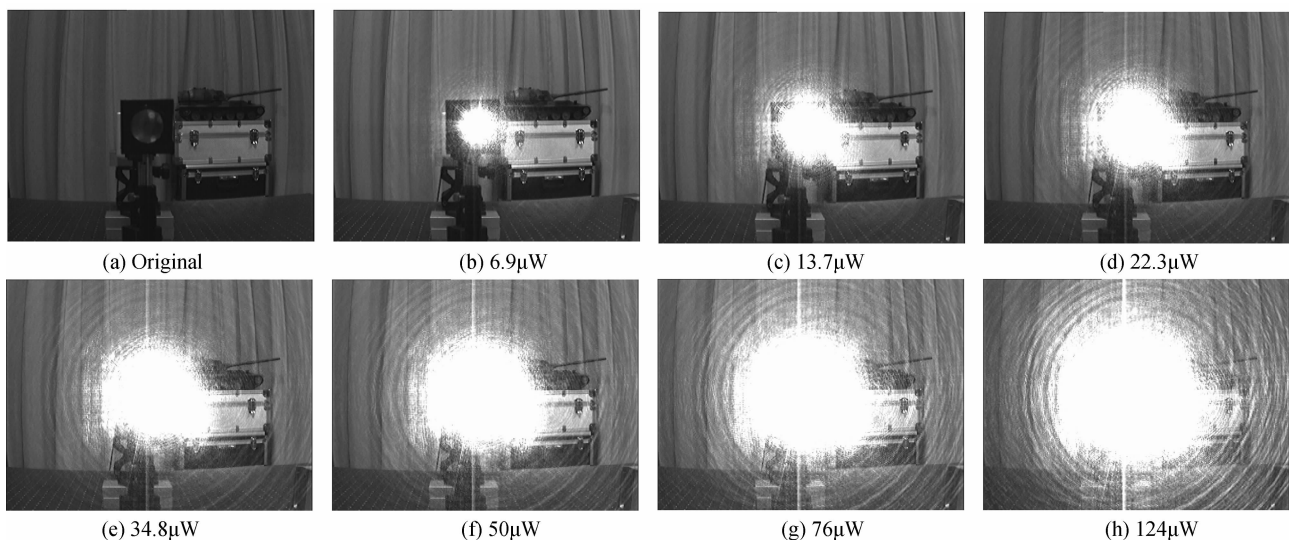


图 5 原始图像及视场内不同功率激光干扰图像

Fig. 5 Original and laser jamming images for different laser power in the field of view

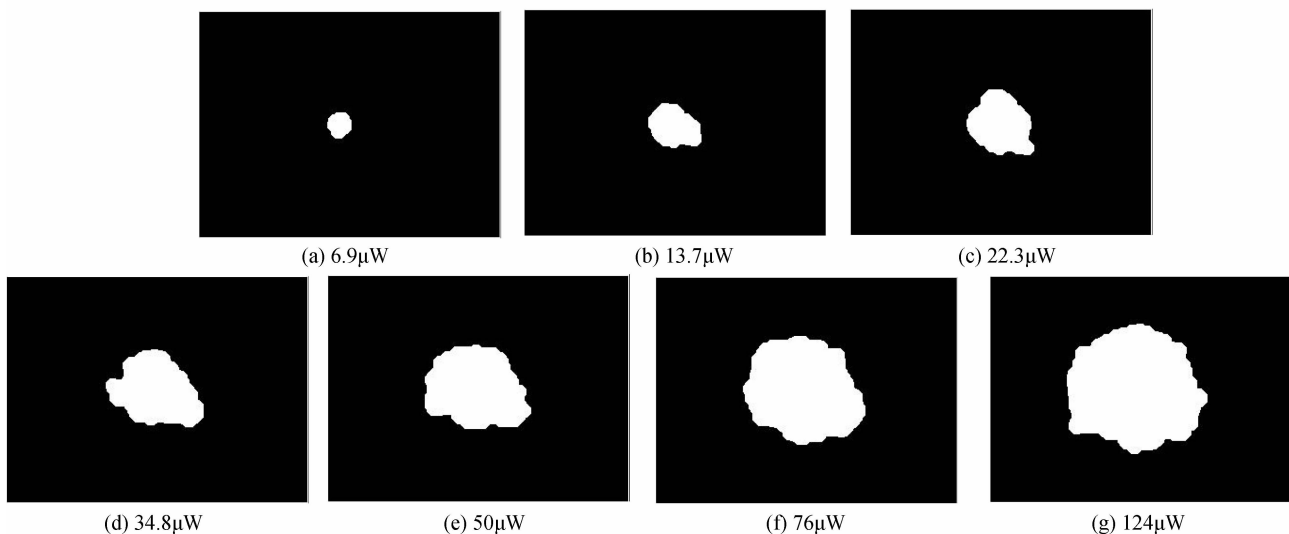


图 6 不同图像光斑提取的二值图像

Fig. 6 The binary image of laser spot segmented from different images

CCD 用于目标检测过程中, 一般离不开对目标检测算法的分析, 因此, 文中对于干扰图像采用 Otsu 算法进行分割, 计算不同图像的分割准确度; 对于归一化积相关检测算法, 统计检测的虚警概率。

有关分割准确度的定义为<sup>[14]</sup>

$$SA = SA_S (1 - SA_E) (1 - SA_L) \quad (7)$$

式中,  $SA_S$  表示算法分割率;  $SA_E$  为过分割率;  $SA_L$  为欠分割率, 且  $SA_S + SA_E + SA_L = 1$ 。

相关检测虚警率可用下式进行统计<sup>[15]</sup>

$$P_{fa} = \frac{Num_{AboveThreshold}}{Num_{Total}} \quad (8)$$

式中,  $Num_{AboveThreshold}$  表示相关曲面上超过阈值的背景点个数;  $Num_{Total}$  表示相关曲面上背景点的总数。

运用式(3)、(7)、(8)和式(4)、(5) 分别对图 5 与图 6 进行计算, 将计算得到的结果带入式(6), 根据得到的结果, 可以作出分割准确度 SA 和相关检

测虚警概率  $P_{fa}$  与激光功率关系曲线, 分别如图 7 (a)、(b)所示. DC 尺度与激光功率的关系曲线如图 7(c)所示。

图 7(a)中, Otsu 算法分割准确度 SA 随激光功率的增大而减小. 图 7(b)中, 相关检测算法虚警概率  $P_{fa}$  随激光功率的增大呈下降趋势, 这是由于激光干扰程度的不断加深, 越来越多的“杂波信号”参与到了边缘检测和背景点个数统计的计算当中, 导致分割准确度下降, 虚警率上升. 图 7(c)中, DC 尺度随着激光功率的增加而呈上升趋势, 主要是由于饱和和光斑尺寸不断增大, 干扰图像中低频分量相应增加, 同时, 光斑周围呈“斑驳状”散斑的不断增多致使干扰图像经小波分解后高频分量逐渐增大, 小波能量尺度变大, 计算得到的 DC 值不断增大. 从图中还可以看出, 随着激光功率的增大, DC 尺度由一开始的急剧增大逐渐变为缓慢增加, 这是因为随着激光

功率的增加, CCD 受到干扰的程度越来越严重, CCD 饱和和像素数急剧增大, DC 值相应快速增长, 当激光功率增大到一定程度时, 在干扰图像上, 光斑及其周围的散斑变化已不明显, 导致 DC 尺度缓慢上升.

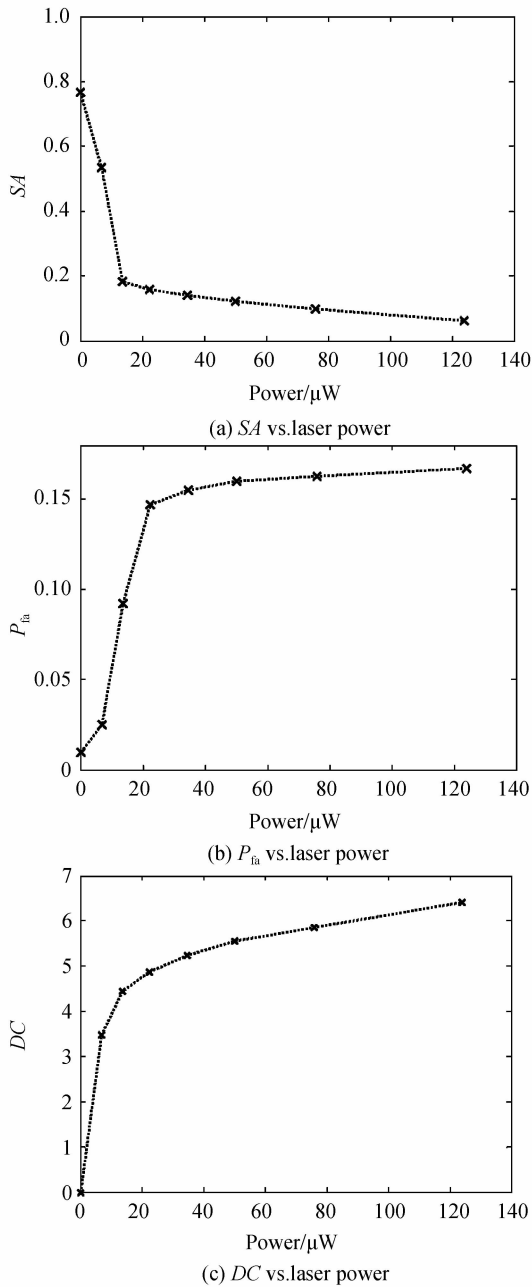


图 7 SA,  $P_{in}$ , DC 与激光功率关系  
Fig. 7 SA,  $P_{in}$ , DC vs. laser power

与此同时, 进行了 6 组对照实验, 目的在于验证当激光入射功率相同情况下, 光斑尺寸和小波能量尺度呈现不同变化趋势时 DC 尺度的有效性. 基本实验装置如图 4 所示, 并在 CCD 摄像机前增加由一个凹透镜和凸透镜组成的望远镜系统, 用于调节光斑大小. 实验中采集的不同入射功率对应的激光干扰图像分别如图 8、图 9, 分别对应入射激光功率为  $6.9 \mu\text{W}$ 、 $13.7 \mu\text{W}$ 、 $22.3 \mu\text{W}$ 、 $34.8 \mu\text{W}$ 、 $50 \mu\text{W}$ 、

$76 \mu\text{W}$ . 在图 8 中, 激光饱和光斑尺寸较大, 散斑干扰较弱. 而在图 9 中, 激光饱和光斑尺寸较小, 散斑干扰较强.

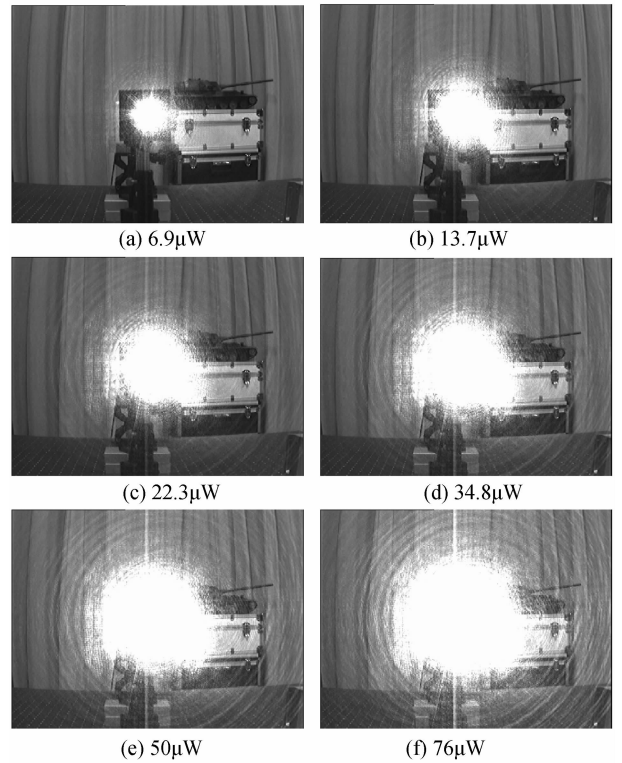


图 8 视场内不同功率激光干扰图像(大光斑)  
Fig. 8 Laser jamming images for different laser power in the field of view (large spots)

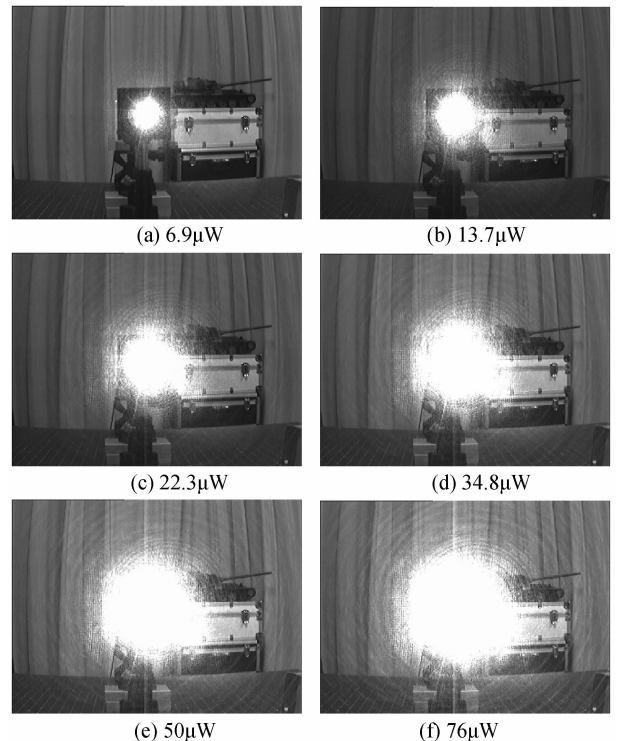


图 9 视场内不同功率激光干扰图像(小光斑)  
Fig. 9 Laser jamming images for different laser power in the field of view (small spots)

运用式(1)~(6)对图 8、图 9 中的干扰图像分

别进行计算,根据得到的结果分别作出分割准确度  $SA$ 、虚警概率  $P_{fa}$ 、饱和光斑尺度  $D_c$ 、小波能量尺度

$C_{ave}$ 以及图像尺度  $DC$  随入射激光功率变化的关系曲线如图 10 所示。

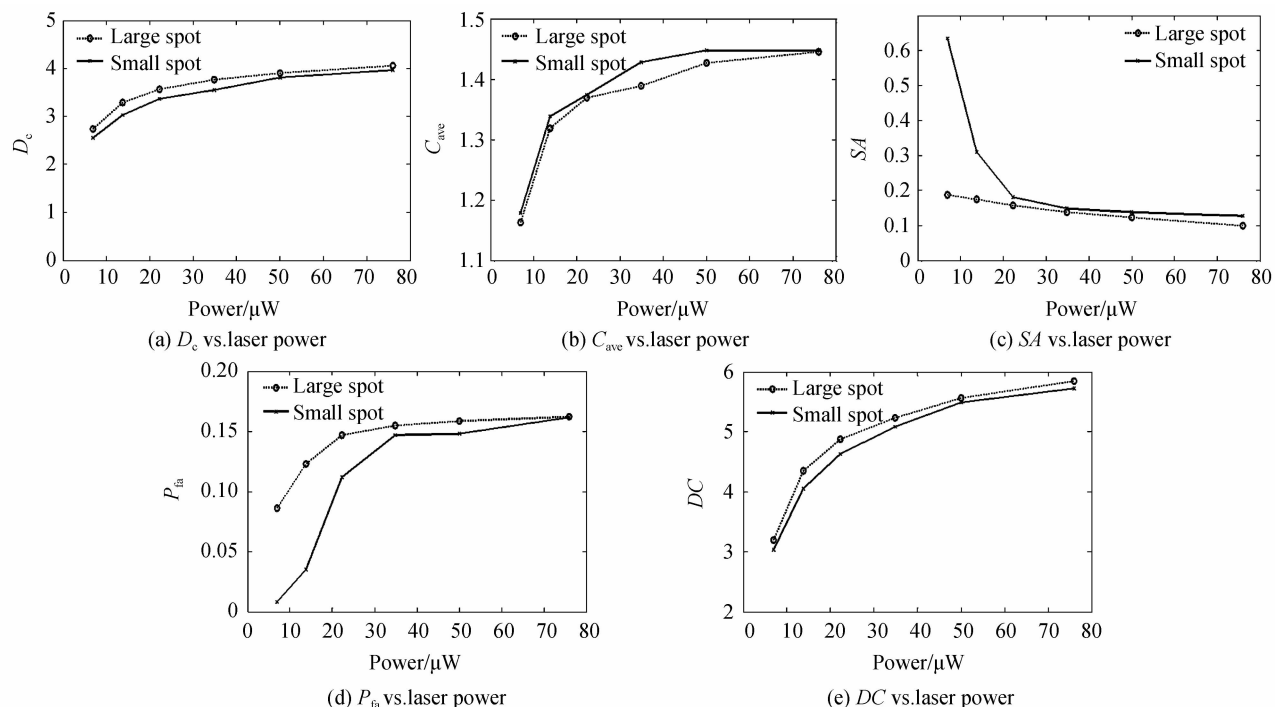


图 10  $D_c$ 、 $C_{ave}$ 、 $SA$ 、 $P_{fa}$ 、 $DC$  尺度与激光功率关系

Fig. 10  $D_c$ 、 $C_{ave}$ 、 $SA$ 、 $P_{fa}$ 、 $DC$  vs. laser power

图 10(a)、(b)中,在同一功率处,大光斑干扰图像的  $D_c$  尺度均大于小光斑干扰图像的  $D_c$  尺度,且随着激光功率的增加, $D_c$  尺度呈上升趋势;而大光斑的  $C_{ave}$  尺度均小于小光斑的  $C_{ave}$  尺度,且随着激光功率的增加, $C_{ave}$  尺度也呈上升趋势.这说明在同一功率处,图 8 中各干扰图的饱和光斑面积要大于图 9 中对应的干扰图,而图 9 中受高频散斑干扰的程度则更严重些.因此,仅凭单一  $D_c$  尺度或  $C_{ave}$  尺度无法对干扰效果好坏进行有效判断.通过图 10(c)、(d)可以看出在同一功率处,大光斑干扰图像的分割准确度要小于小光斑干扰图像,虚警率则相反,这说明在本实验中大光斑的实际干扰效果好于小光斑.由图 10(e)可以看出,在同一功率处,大光斑干扰图像  $DC$  尺度均大于小光斑干扰图像,大光斑干扰效果较好,这与前面分析的结论相一致.综上所述, $DC$  尺度能够充分结合激光干扰图像频率特点,较好地反映激光干扰对 Otsu 算法分割准确度和相关检测算法虚警概率的影响,实现了激光干扰 CCD 效果的量化评估。

## 4 结论

本文分析了激光干扰对 CCD 成像系统的影响,针对激光干扰图像的特点,结合小波变换在图像处理中的优势,提出了一种基于小波能量和光斑尺寸的图像尺度,并将该尺度运用到激光干扰 CCD 的效

果评估中.研究表明:激光干扰会使得 CCD 成像系统目标检测算法的分割准确度降低,并且会提高相关检测中的虚警概率,从而降低 CCD 的目标检测性能.实验和数值计算显示,结合干扰图像中低频分量和高频分量的综合图像尺度可以反映 CCD 受激光干扰的程度,初步验证了该方法的有效性。

## 参考文献

- [1] WANG Shi-yong. Study on laser-induced CCD detector vulnerability and survivability and fussy synthetic evaluation on CCD jamming effects[D]. Changchun: Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, 2002, 1-2.  
王世勇. 激光对 CCD 探测器干扰损伤的研究及模糊评估[D]. 中国科学院研究生院博士学位论文, 2002, 1-2.
- [2] XU Jie, ZHAO Shang-hong, WU Ji-li, et al. Integrated fuzzy evaluation method of photoelectric jamming to detector[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, **34**(6): 30-34.  
胥杰,赵尚弘,吴继礼,等. 激光干扰光电探测器综合模糊评估方法[J]. *光电工程*, 2007, **34**(6):30-34.
- [3] SUN Yun-qiang, CHENG Xiang-ai, WANG Fei. Method of quality evaluation aimed at laser-disturbing image [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(5): 659-662.  
孙运强,程湘爱,王飞. 一种针对激光干扰图像的质量评价方法[J]. *红外与激光工程*, 2007, **36**(5): 659-662.
- [4] QIU Dong-dong, ZHANG Zhen, WANG Rui, et al. Mechanism research of pulsed-laser induced damage to CCD imaging devices [J]. *Acta Optical Sinica*, 2011, **31**(2): 0214006-1-0214006-2.  
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[J]. *光学学报*, 2011, **31**(2): 0214006-1-0214006-2.
- [5] GUO Shao-feng, CHENG Xiang-ai, FU Xi-quan, 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.  
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[J].强激光与粒子束,2007,19(11):1783-1786.
- [6] CHANG Hong-hua, ZHANG Jian-qi. Machine vision-based quantitative characterization of IR background clutter [J]. *Infrared Technology*, 2005, 27(5): 403-407.  
常洪花,张建奇.基于机器视觉系统的红外背景杂波量化技术[J].红外技术,2005,27(5):403-407.
- [7] CHANG Hong-hua. The effect of background clutter on the TA performance of IR imaging systems[D]. Xi'an: Xidian University, 2005, 26-30.  
常洪花.背景杂波对红外成像系统目标获取性能的影响[D].西安电子科技大学硕士学位论文,2005,26-30.
- [8] GILLIAN K, GROVES, KIM M. Quantification of clutter in EO tracking system[C]. *SPIE*, 1994, 2221: 287-295.
- [9] MA Wen-wei, ZHAO Yong-qiang, ZHANG Guo-hua, et al. Infrared dim target detection based on multi-structural element morphological filter combined with adaptive threshold segmentation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 40(7): 1020-1022.  
马文伟,赵永强,张国华,等.基于多结构元素形态滤波与自适应阈值分割相结合的红外弱小目标检测[J].光子学报,2011,40(7):1020-1022.
- [10] WANG Ying, LIANG Nan, GUO Lei. A hyperspectral remote sensing image endnumber extraction algorithm based on modified extended-morphological operator [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, 41(6): 672-673.  
王瀛,梁楠,郭雷.一种基于修正扩展形态学算子的高光谱遥感图像端元提取算法[J].光子学报,2012,41(6):672-673.
- [11] MA Ji-ming, SONG Gu-zhou, WANG Qun-shu, et al. An impulse noise removing method in radiography [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, 39(11): 2107.  
马继明,宋顾周,王群书.辐射图像脉冲去噪方法[J].光子学报,2010,39(11):2107.
- [12] XU Yin, SHAO Li, SUN Xiao-quan. Image metric analysis of laser jamming effect on CCD tracking performance [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(5): 1182-1183.  
徐银,邵立,孙晓泉.激光干扰对 CCD 跟踪性能影响的图像尺度分析[J].红外与激光工程,2012,41(5):1182-1183.
- [13] XU Yin, SUN Xiao-quan, SHAO Li. Impact of laser jamming on target detection performance in CCD imaging system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(4): 991-992.  
徐银,孙晓泉,邵立.激光干扰对 CCD 成像系统目标检测性能的影响[J].红外与激光工程,2012,41(4):991-992.
- [14] LI Min, ZHOU Zhen-hua, ZHANG Gui-lin. Image measures in the evaluation of ATR algorithm performance [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(3): 412-416.  
李敏,周振华,张桂林.自动目标识别算法性能评估中的图像质量[J].红外与激光工程,2007,36(3):412-416.
- [15] ZHANG Ya-nan, TANG Xin-yi. Research on performance evaluation approaches of infrared automatic target recognition algorithms [J]. *Infrared*, 2007, 28(6): 15-20.  
张亚楠,汤心溢.红外目标自动识别(ATR)算法性能评估的方法研究[J].红外,2007,28(6):15-20.