

基于小波变换的激光干扰图像质量评价

刘严严 赵英超 胡涛

(光电信息控制和安全技术重点实验室, 河北 三河 065201)

摘要 分析了激光对 CCD 探测器的干扰损伤机理及损伤图像的特点,总结了常用图像质量评价流程,分析了激光干扰图像质量评价要考虑的因素。通过实验对采集的连续两帧激光干扰图像运用客观质量评价方法进行评价,得到了误差、信噪比及相似度的评价结果。实验结果表明对于两帧连续采集的激光干扰图像,其干扰效果差别不明显,这与主观质量评价结果是一致的,表现为其原始图像、差值图像及直方图没有明显变化,两帧图像误差评价结果均小于 0.058%,峰值信噪比参数(PSNR)为 51.0793 dB,相似度评价参数相关系数为 0.9999。针对两幅图像差别细微的特点,采用小波变换的方法提取了差值图像的水平、垂直、近似及对角线等细节分量,结果表明对差值图像进行小波变换所得结果可以较好地体现原始图像的细节信息。

关键词 图像处理;激光干扰;质量评价;小波变换;图像细节

中图分类号 TN972 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.111001

Quality Assessment of Laser Disturbing Images Based on Wavelet Transform

Liu Yanyan Zhao Yingchao Hu Tao

(Science and Technology on Electro-Optical Information Security Control Laboratory,
Sanhe, Hebei 065201, China)

Abstract Both the vulnerability and laser-induced damaged image character of CCD detector are studied. The commonly used image quality assessment process is summed up. The error, signal-to-noise ratio and the similarity of two frame of series laser disturbing images are assessed through objective assessment methods. The results show that the disturbing effect of two frame of series laser disturbing images is not obvious and it is consistent with the subjective assessment, which are demonstrated in four aspects, the change of original images and the difference image along with their histograms are not obvious, the gray value difference of both images is less than 0.058%, the peak signal-to-noise ratio is 51.0793 dB and the correlativity is 0.9999. According to the nuance of two images, the vertical, horizontal, approximate and diagonal details of difference image is picked up by wavelet transform and results can reflect the original image details better.

Key words image processing; laser disturbing; quality assessment; wavelet transform; image detail

OCIS codes 100.7410; 100.2960; 100.2980; 100.3010; 140.3330

1 引言

随着激光技术的发展,激光光电探测系统的干扰和破坏能力引起广泛的重视。从 20 世纪 70 年代以来,美国、前苏联等国家先后进行了多次反卫星激光武器的研究和实验,由于卫星与地面之间的距离相对较远,利用脉冲或连续的激光直接破坏卫星主体所需激光能量很大,因此激光辐照卫星极易造成光电探测系统的干扰和破坏^[1]。激光对光电成像系统的干扰效果评估就成为一个重要的研究课题,目前有大量文献对激光干扰成像系统的干扰效果进行评估,但大多都集中于对激光干扰的机理研究及相应的激光干扰实验搭建、干扰效果评估模型的建立等方面^[2~7]。如文献[3]的主要研究工作在于激光对 CCD 探测干扰的机理研究以及不同体制激光干扰 CCD 探测的实验研究及干扰损伤建模评估。对于图像质量评价方面的研究,大多数文献

收稿日期: 2012-06-10; 收到修改稿日期: 2012-07-06; 网络出版日期: 2012-10-15

作者简介: 刘严严(1980—),女,硕士,工程师,主要从事光电信号处理和数字图像处理等方面的研究。

E-mail: lyy13@126.com

集中在对于人眼视觉特性以及视觉注意机制的研究^[8~10]。如文献[9]是基于视觉感知的视觉注意模型的研究;而对于激光干扰的干扰效果从图像角度进行的分析甚少^[11]。本文从图像受干扰程度方面讨论运用图像质量评价的方法,对激光干扰效果进行干扰图像质量评估。

2 激光对 CCD 探测器干扰机理及干扰图像特点

激光对 CCD 探测器的破坏分为软破坏与硬破坏两种。软破坏是指组成 CCD 的半导体材料中处于杂质能带的电子因吸收激光能量大量向导带跃迁引起暗电流增大而使器件失效甚至烧毁。硬破坏是指强激光束照射 CCD 探测器引起 CCD 的材料和结构发生损伤。硬破坏的能量阈值较高,约为数千到一万以上焦耳每平方米,如对于飞机蒙皮和导弹壳体等金属材料的破坏;软破坏所需的激光功率较低,如对光电传感器的破坏属软破坏,仅需数十焦耳每平方米。

激光对光电探测器的破坏机理主要有三种效应^[12],即热烧蚀、力学效应和辐射破坏。不论哪种效应,都应使目标接收到足够的辐照度。光电探测器的损伤阈值取决于激光照射时间、功率密度、波长、探测器结构、探测器材料的光学和热学特性等。CCD 探测器的干扰与损伤阈值主要包括 CCD 像元饱和阈值、局部受光辐照时的 CCD 饱和功率密度阈值、局部热饱和功率密度阈值、CCD 探测器的局部损伤阈值、破坏阈值、熔融阈值和光学击穿阈值。

对于同样 CCD 成像系统,激光照射时间、功率密度和波长等参数多不相同,在干扰图像上会有不同,表 1 为激光对 CCD 图像干扰的评价标准。

表 1 激光对 CCD 图像干扰标准
Table 1 Jamming criterion of laser to CCD image

| Level | Jamming image | Degree of CCD injury |
|-------|--|--|
| 0 | Image un-changed | No detection pixel saturation |
| 1 | Bright spot or small area of bright spots on the image | A few detection pixel saturation |
| 2 | A large amount of bright spots appear on image, a temporary failure or blindness after stop jamming and its performance can restore or partially restore | A mount of pixel saturation |
| 3 | Image disappear and it can not be restoration after stop jamming | Image capabilities permanently disabled because of detector components or optical components were injured. |

3 激光干扰图像质量评价流程

3.1 图像质量评价一般流程

如图 1 所示,一般图像质量评价的流程为:

- 1) 提取特征信息,即提取图像(包括原始图像、待评价图像)的灰度值均值,灰度值的标准差和图像信息熵等;
- 2) 构建评价函数,即选择评价方法,根据基于误差(信噪比)、相似度、人眼视觉、频域或者现有的评价方法构建适合待评价图像的评价函数;
- 3) 获得评价映像,即已构造的评价函数对图像评价的结果值;
- 4) 汇聚分析评价映像值,评价终给出结果。

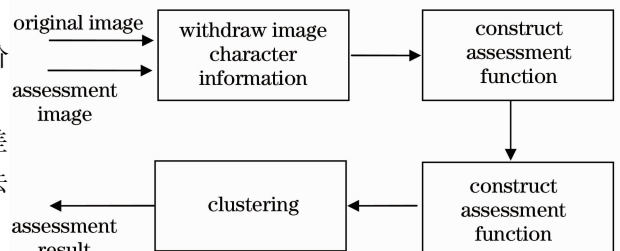


图 1 图像质量评价一般流程图

Fig. 1 Flow chart of general image-quality assessment

3.2 激光干扰图像质量评价考虑因素

- 1) 信噪比。信噪比的计算有赖于对系统的噪声模型的建立和噪声的计算。常用的噪声估计方法有方差法、局部方差法和去相关法等^[13]。根据实际情况选择合适的噪声计算方法,再通过实验和计算,可以估计出噪声。

- 2) 灰度直方图。一幅图像的直方图是唯一的,直方图反映了图像中各灰度出现的概率,所以在直方图

上,可以观察图像的梯度分布情况。对于激光干扰图像可以根据灰度直方图选择阈值,进行图像的分割,进而进行质量评价。

3) 干扰图像区域划分。在激光干扰图像中,通常受干扰图像只占整幅图像的某一部分。因此,根据目标图像的特点进行区域划分很重要。

4) 干扰条件。利用激光进行干扰,采取不同激光波长、体制(连续、脉冲)脉宽、重复频率以及干扰方式等因素,干扰效果会有所不同,反映在激光干扰图像上也会有所不同。

5) 评价方法及评价函数的选择。激光干扰图像因干扰条件、方式、对象的不同,表现在干扰图像上也会有很大差别,对应不同的干扰图像,应选择合适的评价函数,使之与实际的客观条件一致。

4 基于细微差别的激光图像的质量评价

4.1 图像特点分析及特征提取

图2为采集的激光干扰图像视频序列中的连续两帧图像及其直方图,两幅图像采集的时间间隔极短,可

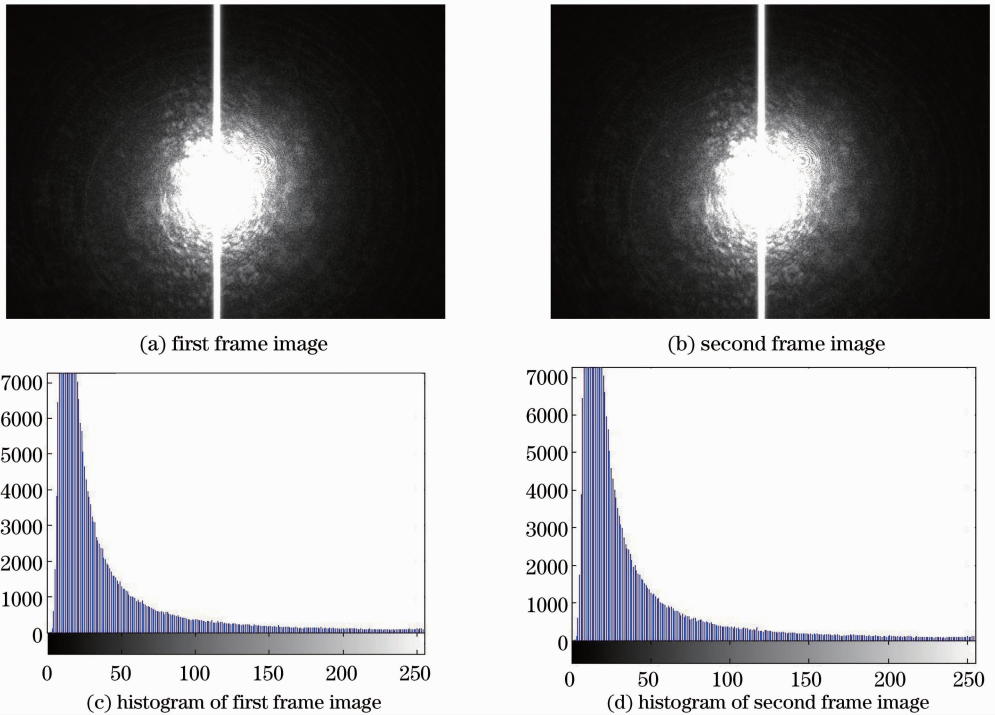


图2 评价图像及其直方图

Fig. 2 Assessed images and their histograms

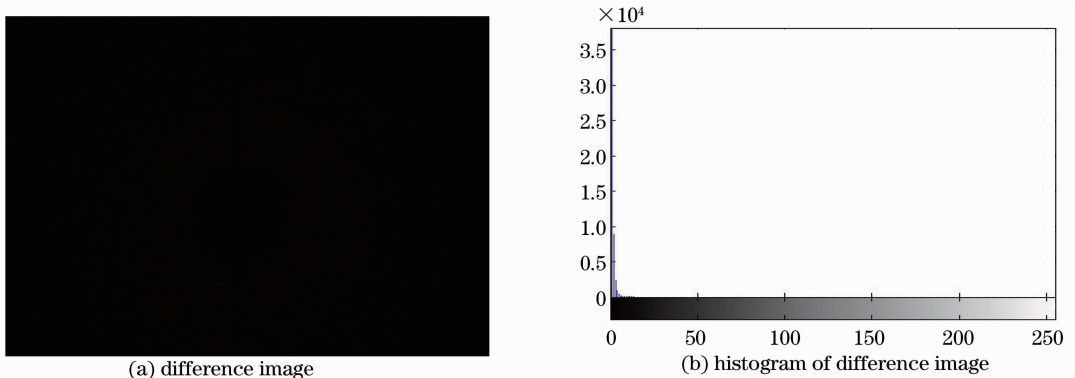


图3 差值图像及其直方图

Fig. 3 Difference image and their histograms

以看出两幅图像及其直方图差别都不大;图3为图2所示的两幅图像的差值图像及差值图像的直方图,可以看出差值图像像素变化不明显,反映在直方图上变化也不明显,即其差值图像及其直方图上只有微小变化。

图像的特征提取主要是图像的基本信息,如图像直方图、均值、方差及图像的信息熵等,通过图像的基本信息来评价两幅图像。表2为采集图像及其差值图像的灰度值信息值。

表2 图像灰度值信息表
Table 2 Image gray information

| Image | Mean | Standard deviation | Variance | Entropy |
|-----------------|---------|--------------------|-----------|---------|
| First frame A1 | 50.1225 | 66.809 | 4463.4458 | 6.2206 |
| Second frame A2 | 50.0833 | 66.7935 | 4461.3754 | 6.2196 |

4.2 评价函数构造

1) 基于误差(信噪比)的质量评价

基于误差信噪比的质量评价通常有峰值信噪比(PSNR)、信噪比(SNR)、均方差(MSE)、标准平均方差(NMSE)等参数。MSE或PSNR作为比较常用方法,是基于MSE的最小值通过逐像素点比较参考图像和待评价图像像素点之间的差值,是一种基于Minkowsld汇聚策略的评价方法^[14],两者的表达式分别为

$$\epsilon_{MS} = \frac{1}{MN} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} (f_{ij} - f'_{ij})^2, \quad (1)$$

$$R_{PSN} = 10 \lg \frac{f_{\max}^2}{\epsilon_{MS}}, \quad (2)$$

式中 M, N 分别为图像的长和宽, f_{ij} 为图像的灰度值, f'_{ij} 为图像的均值, f_{\max} 为图像灰度最大值。

2) 基于相似度的质量评价

基于相似度的质量评价是用两幅图像的相关程度评价图像质量。评价的参数包括基于两幅图像的亮度值相似度、对比度相似度、背离度相似度、扭曲度相似度、结构相似度及两幅图像的相关系数。

$$f_{SSM}(x, y) = [l(x, y)]^\alpha \cdot [c(x, y)]^\beta \cdot [S(x, y)]^\gamma, \quad (3)$$

式中 $f_{SSM}(x, y)$ 为结构相似度评价函数, $L(x, y) = \frac{2\mu_x\mu_y + C_1}{\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1}$, $C_1 = (K_1L)^2$, $C(x, y) =$

$\frac{2\sigma_x\sigma_y + C_2}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2}$, $C_2 = (K_2L)^2$, $S(x, y) = \frac{\sigma_{xy} + C_3}{\sigma_x\sigma_y + C_3}$, $C_3 = C_2/2$, $L(x, y)$ 为亮度比较函数, $C(x, y)$ 为对

比度比较函数, $S(x, y)$ 为结构比较函数。 $\alpha, \beta, \gamma > 0$ 这3个参量是对亮度、对比度和结构信息进行权值调整; μ_x, μ_y 分别为图像块 x 和图像块 y 的亮度均值,作为亮度估计; σ_x, σ_y 分别为图像块 x 和图像块 y 的标准差; C_1, C_2, C_3 是为了避免分母为零而引入的常数; L 为像素值的动态范围; K_1, K_2 是一个远小于1的常数。

3) 基于变换域的质量评价

基于灰度值、误差以及相似度差异的评价都是基于图像的灰度值差异来评价图像质量的,但有时基于灰度的质量评价不能客观的反映质量评价结果,如图2所示的两幅图像,要想获得图像的细节信息就要从变换域入手。小波变换具有多分辨率特性,图像通过小波变换,可以得到不同分辨率图像的水平、垂直和对角线上的细节信息^[15]。同时小波变换又具有边缘检测特性,图像通过小波变换,可以得到各个方向上的边缘细节信息。

小波的定义如下^[16]:小波是满足一定条件下的函数 $\Psi(t)$ 通过伸缩和平移产生的一个函数族:

$$\phi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad a, b \in \mathbb{R}, \quad a \neq 0 \quad (4)$$

式中 $\Psi(t)$ 为小波母函数; a, b 分别为 $\Psi(t)$ 分别为伸缩和平移因子。

对于任意函数 $f(t) \in R^2$ 的连续小波变换为

$$\omega_f(a, b) \leq f(t), \quad \phi_{a,b}(t) \geq \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \quad (5)$$

式中 $\omega_f(a, b)$ 为小波变换系数; a 称为尺度因子,所以它的变化代表频率的变化; b 称为平移因子,它的变化

代表时间的变化。在实际应用中,尤其在计算上,小波变换必须离散化。实际中多使用尺度因子及平移因子均为离散的二进制离散小波变换,取 $a = 2^m, b = n2^m$, 则对应的小波函数为

$$\psi_{m,n}(t) = 2^{-m/2} \psi(2^{-m/2} t - n). \quad (6)$$

小波函数主要有 Harr 小波、Daubechies 小波系及 Biorthogonal 小波系等。

5 激光干扰图像评价映像及评价结果分析

从表 2 所得两幅图像的灰度值、均值方差等数据很难得到两幅图像差别的细节信息,从这几个参数看来两幅图像的差别很小,其对应均值、标准差、方差及信息熵相差分别为 0.058%,0.023%,0.046% 及 0.016%。

从差值图像入手,获得差值图像及两幅图像的信噪比评价及相似度评价,取 $M = 480, N = 640, L = 255, C_1 = 6.5025, C_2 = 58.5225, C_3 = 29.2612, K_1 = 0.01, K_2 = 0.03, \alpha = \beta = \gamma = 1$, 评价结果如表 3~5 所示,其中 E 为两幅图像的灰度差值图像, d_{rms} 为两幅图像之间的平方平均误差,

$$d_{\text{rms}}(f, f') = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} (f_{ij} - f'_{ij})^2},$$

f 及 f' 分别为两幅图像, M, N 分别为图像的长度和宽度。

表 3 差值图像灰度值信息表

Table 3 Information of difference image gray value

| Image | Mean | Standard deviation | Variance | Entropy |
|--------------------|--------|--------------------|----------|---------|
| Difference image E | 0.3324 | 0.6999 | 0.4899 | 1.07027 |

表 4 以第一帧图像为参考图像的差值图像误差信噪比评价结果表

Table 4 Difference image error signal-to-noise ratio assessment results to the first image as a reference

| MSE | NMSE | drms | SNR /dB | PSNR /dB |
|--------|--------|--------|---------|----------|
| 0.5072 | 0.0001 | 0.7122 | 39.4431 | 51.0793 |

表 5 第二帧图像与第一帧图像的相似度评价结果表

Table 5 Similarity assess results of two images

| Brightness | Contrast | Structure | Structure similarity | Correlation | Deviation | Distortion |
|------------|----------|-----------|----------------------|-------------|-----------|------------|
| 1 | 1 | 0.8271 | 0.8271 | 0.9999 | 0 | 0.2932 |

表 3 为差值图像灰度信息表,可以看出差值图像的信息量很少,其均值仅为 0.3324;表 4 为误差及信噪比参数的评价结果,可以看出两幅图像的差别不明显($\epsilon_{\text{NMS}} = 0.001, R_{\text{PSN}} = 51.0793$ dB),这与主观评价结果是一致的(当 $R_{\text{PSN}} > 30$ 时,人眼无法分辨);表 5 为相关度评价结果,可以看出两幅图像相似度很高(相关系数为 0.9999)。表 3、4、5 的评价可以定量给出两幅图像的细小差别且结果都与主观评价结果相一致。

综上所述可得,对差值图像的灰度值信息及两幅图像的相似度评价只能定量评价两幅图像的质量评价结果,不能反映图像差值的细节信息,所以本文从变换域入手,选用小波变换的方法,对差值图像进行小波处理来提取差值图像的细节信息,从而实现两幅图像的质量评价。

选用‘Bior3.7’小波,即选用 Biorthogonal 小波系,低通重建滤波器的阶次为 3,低通分解滤波器的阶次为 7,得到差值图像的水平、垂直及对角线细节,从而得到差值图像的细节信息。图 4 为对差值图像进行小波变换所得差值图像的一层、二层小波变换及其在水平、垂直、近似分量以及对角线分量的结果。从图 4 可以看出,两幅图像的差值图像很好地反映了原始图像的细节信息。

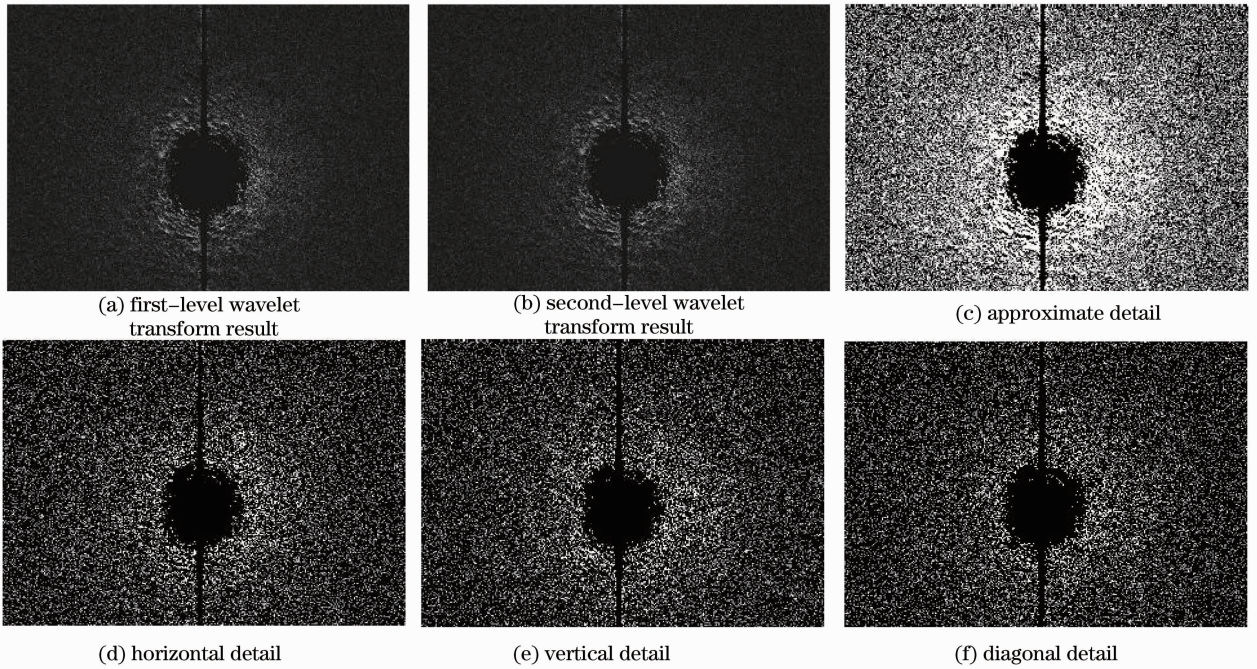


图4 对差值图像做小波变换结果图

Fig. 4 Wavelet transform of difference image

6 结 论

激光对 CCD 成像系统干扰效能是一项复杂的系统工程,本文对激光的图像质量评价方法进行了研究,并对实际中具有细微差别的相邻两帧图像的图像质量进行了评价,研究了用小波变换的方法提取差值图像细节的方法,得到了理想的结果。

参 考 文 献

- 1 Niu Yanxiong, Zhang Peng, Yao Jianquan *et al.*. Investigation of laser disturbance and damage to satellite-borne photoelectric detecting system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(7): 793~796
牛燕雄, 张 鹏, 姚建铨 等. 强激光对星载光电探测系统的干扰与破坏研究 [J]. *光子学报*, 2004, **33**(7): 793~796
- 2 Lin Liyu, Zhang Youyan, Sun Tao. Contourlet Transform—Image Processing Application[M]. Beijing: Science Press, 2008
林立宇, 张友炎, 孙 涛. Coutourlet 变换——影像处理应用[M]. 北京:科学出版社,2008
- 3 Wang Shiyong. Study on Laser-Induced CCD Detector Vulnerability and Survivability and Fussy Synthetic Evaluation on CCD[D]. Changchun: Changchun Institutde of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2002. 21~30
王世勇. 激光对 CCD 探测器干扰损伤的研究及模糊评估[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2002. 21~30
- 4 Li Xiuqian, Cheng Xiangai, Wang Rui *et al.*. Experimental study on the response of HgCdTd(PC) detector irradiated by laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(1): 41~45
李修乾, 程湘爱, 王 睿 等. 激光辐照 PC 型 HgCdTe 探测器的实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2003, **15**(1): 41~45
- 5 He Yuanxing, Jiang Houman. Abnormal response of PV-type HgCdTe detector under intense laser irradiation [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20**(8): 1232~1237
贺元兴, 江厚满. 激光辐照下 PV 型 HgCdTe 探测器反常机理 [J]. *强激光与粒子束*, 2008, **20**(8): 1232~1237
- 6 Liu Yanwu. Experiment research on laser disturbing CCD detectors[J]. *Laser Journal*, 2011, **32**(1): 55~56
刘延武. 激光干扰 CCD 系统的实验研究[J]. *激光杂志*, 2011, **32**(1): 55~56
- 7 Li Xiuqian, Cheng Xiangai, Lu Qisheng *et al.*. The study on the response character of HgCdTe detectors under laser irradiation [J]. *J. Academy of Equipment Command & Technology*, 2004, **15**(2): 113~116

- 李修乾, 程湘爱, 陆启生 等. HgCdTe 探测器的激光辐照响应特性研究 [J]. 装备指挥技术学院学报, 2004, **15**(2): 113~116
- 8 Wang Yuqing, Liu Weiya, Wang Yong. Image quality assessment based on local variance and structure similarity[J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2008, **19**(11): 1546~1553
- 王宇庆, 刘维亚, 王 勇. 一种基于局部方差和结构相似度的图像质量评价方法[J]. 光电子·激光, 2008, **19**(11): 1546~1553
- 9 Zhang Hua. Research on Image Quality Assessment Based on Visual Perception[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009
- 张 桦. 基于视觉感知的图像质量评价方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2009
- 10 Bo Wang, Zhibing Wang, Yupeng Liao *et al.*. HVS-based structural similarity for image quality assessment [C]. *Processings of IEEE International Conference on Signal Processing*, 2008: 1194, 1197
- 11 Sun Yunqiang. Investigation of the Quality Assessment Aimed at Laser-Disturbed Image [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006. 21~30
- 孙运强. 激光干扰图像质量评价方法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2006. 21~30
- 12 Wei Guanghui, Yang Peigen. *Laser Technology in the Weapons Industry*[M]. Beijing: Weapon Industry Press, 1995. 162~165
- 魏光辉, 杨培根. 激光技术在兵器工业中的应用[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1995. 162~165
- 13 Zhao Dapeng, Shi Jiamingl. Effectiveness evaluation method based on the image characteristic for imaging guidance countermeasures [J]. *Laser & Infrared*, 2005, **35**(8): 509~601
- 赵大鹏, 时家明. 基于图像特征的成像制导对抗干扰效果评估方法[J]. 激光与红外, 2005, **35**(8): 509~601
- 14 Sun Yunqiang, Cheng Xiangai, 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
- 15 Zhou Jingchao, Dai Ruwei, Xiao Bohua. Overview of image quality assessment research [J]. *Computer Science*, 2008, **35**(7): 1~5
- 周景超, 戴汝为, 肖柏华. 图像质量评价研究综述[J]. 计算机科学, 2008, **35**(7): 1~5
- 16 Yao Baodai, Wang Gao. Analysis of terahertz spectrum decreasing noise of explosive based on wavelet transform[J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2011, **26**(7): 63~65
- 姚宝岱, 王 高. 基于小波变换的爆炸物太赫兹光谱降噪分析[J]. 光电技术应用, 2011, **26**(1): 63~65