

文章编号:1007-2780(2013)05-0781-07

## 基于小波加权的激光干扰效果评估

钱 方<sup>1,2</sup>, 郭 劲<sup>1</sup>, 孙 涛<sup>1\*</sup>, 王挺峰<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 激光与物质相互作用国家重点实验室,

吉林 长春 130033, E-mail: qfmail@sina. cn;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:** 光电成像系统是一种被广泛应用的观测工具, 可以用来实现图像的探测、识别和跟踪等多种功能。激光干扰会造成光电系统成像元件的饱和或损伤, 影响成像效果。为了解激光干扰对光电成像系统的影响程度, 研究干扰图像质量评价具有重要意义。提出一种基于小波加权的结构相似度图像质量评价(WWSSIM)算法, 该算法首先将原始图像和降质图像分别进行四级二维小波变换, 划分成为具有不同尺度和不同频率特征的子带图像, 在 13 个频带比较结构相似度, 然后根据人类视觉系统特性, 赋予 13 个频带的结构相似度以相应视觉权重值, 最后通过求和平均得到归一化的图像质量评价指标。为了方便对比, 分别运用均方误差(MSE)、峰值信噪比(PSNR)和结构相似度评价算法(SSIM)对 Live 数据库图像和激光干扰图像进行评价。结果表明, 与 PSNR 算法相比, 提出的 WWSSIM 算法在准确率上提高了 5.2%, 在一致性上提高了 4.1%, 与 SSIM 算法相比, 提出的 WWSSIM 算法在准确率上提高了 2.9%, 在一致性上提高了 2.6%。以上结果说明提出的 WWSSIM 算法相对于 MSE、PSNR 和 SSIM 算法评价结果更加准确, 同时它对激光干扰图像的失真程度能给出更符合人类主观视觉感受的判断。

**关 键 词:** 激光干扰; 人类视觉系统; 小波变换; 图像质量评价; 结构相似度

中图分类号: TP391

文献标识码: A

DOI: 10.3788/YJYXS20132805.0781

## Assessment of Laser-Dazzling Effects Based on Weighted Wavelet Transforms

QIAN Fang<sup>1,2</sup>, GUO Jin<sup>1</sup>, SUN Tao<sup>1\*</sup>, WANG Ting-feng<sup>1</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics Chinese Academy of Sciences,

State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Changchun 130033, China, E-mail: qfmail@sina. cn;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Photoelectric imaging systems are widespread observation tools used to fulfill various functions such as detection, recognition, and video-tracking. Laser countermeasures against imaging systems aim to saturate or damage the full camera image. In order to evaluate the dazzling effects of the laser and avoid such a disturbance, evaluation of laser-induced effects must be better understood. This paper propose a new algorithm composed of weighted wavelet structural similarity (WWSSIM), based on wavelet transforms and HVS property. Four-level 2D wavelet decomposition is performed for the original and disturbed images, respectively. Each image can be partitioned into one low-frequency subband and a series of octave high-pass subbands. Different subbands are processed with different weighting factors. Based on the results of the above, we can construct a modified WWSSIM. Comparison experiments

收稿日期: 2013-03-06; 修订日期: 2013-04-25

基金项目: 吉林省重大科技攻关专项(No. 20126015); 国家重点实验室基金(No. SKLLIM1203-01)

作者简介: 钱方(1987-), 女, 吉林长春人, 博士研究生, 主要从事激光辐照效应方面的研究。

\* 通信联系人, E-mail: st\_23@sohu. com

show that the prediction accuracy and consistency of the proposed metric are respectively 5.2% and 4.1% higher than the PSNR index. The prediction accuracy and consistency of the proposed metric are respectively 2.9% and 2.6% higher than the SSIM index. In terms of experiment results, the new algorithm shows good feasibility comparing with MSE, PSNR and SSIM methods. WWSSIM is efficacious to reflect the laser dazzling effect.

**Key words:** laser countermeasure; human visual system; wavelet transform; image quality assessment; structural similarity

## 1 引 言

光电成像系统被激光干扰后会造或干扰或损伤,使其成像质量受到严重影响,因此图像质量的下降程度就反映了激光干扰的破坏程度。为了定量分析激光对成像元件的干扰程度和采集图像中信息的损失情况,对激光干扰图像质量评价的研究十分重要。

传统的客观图像质量评价指标有均方误差(mean squared error, MSE)、峰值信噪比(peak signal-to-noise ratio, PSNR)等。虽然 MSE 和 PSNR 计算形式上非常简单,物理意义也很清晰,但是因为它们是基于原始图像和失真图像像素之间灰度值差异而定义的,所以在某些情况下的评价结果会出现较大偏差<sup>[1]</sup>。近年来,Zhou Wang 等人提出了一种基于结构相似度的图像质量评价方法(structural similarity, SSIM),它考虑了人类视觉的高级特性,忽略了图像结构内部可能出现的逐点误差或者空间漂移,而且算法思想简单,计算复杂度不高<sup>[2-3]</sup>。但是在激光干扰图像中,光斑位于某一固定区域,与一般均匀分布的噪声对图像质量的影响不同,SSIM 算法是基于图像整体结构失真来评价图像质量的,这就导致了该算法在评价局部严重失真的激光干扰图像质量时准确性较低。

基于以上分析,本文提出了一种基于小波加权的结构相似度(weighted wavelet structural similarity, WWSSIM)图像评价算法。首先将原图像和降质图像分别进行小波变换,划分成为具有不同尺度和不同频率特征的子带图像,然后分别比较各个子带图像之间的结构相似度,并依据视觉系统特性对子带图像的结构相似度进行加权,得出子带图像的评价值,最后通过对各个子带图像的评价值求和平均得出归一化的评价结果。

## 2 干扰效果分析

激光对图像的干扰主要是一种掩盖效应,激光光斑覆盖了图像中的有用信息,降低了光斑周围的细节分辨率。图 1 是 4 幅激光干扰功率不同的图像。

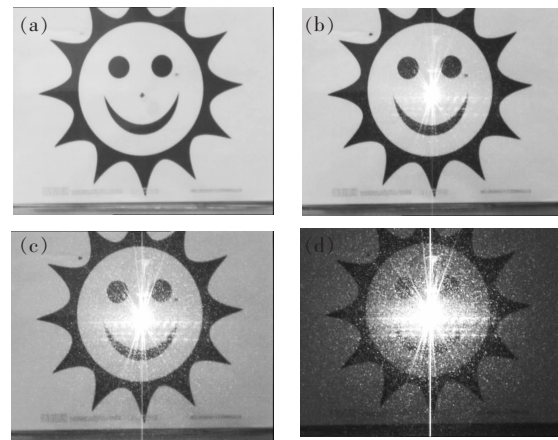


图 1 激光干扰图像。(a) 0 mW, (b) 200 mW, (c) 260 mW, (d) 275 mW.

Fig. 1 Laser dazzling images. (a) 0 mW, (b) 200 mW, (c) 260 mW, (d) 275 mW.

如图 1 所示,图 1(a)是没有激光干扰的原始图像。随着激光干扰的出现,图像的中心位置出现一个白色的光斑,如图 1(b)。激光功率增强,光斑逐渐变大,图像对比度下降,图像质量进一步降低,如图 1(c)。当激光能量足够大,局部光强超过饱和阈值,剩余电荷向周围转移,图形中心出现一条亮线,即“光饱和和串音”现象,如图 1(d)。从图 1 中可以看出,随着激光干扰功率的增强,激光光斑逐渐变大,图像对比度下降。当激光功率足够强时,激光直接辐照区域达到了饱和,未被照射区域沿着电荷传输方向出现亮线。当激光功率继续增加,亮线则不断加宽,干扰效果更加明显。

### 3 基于小波加权的 SSIM 算法

#### 3.1 小波 SSIM 算法

因为在不同的分辨率下,图像的细节刻画了不同尺度的物理结构,所以多分辨率分析的思想常常被引入图像处理中。图像的这种由粗到细的多分辨率分析过程多采用倍频程方式划分,就是将图像分解到在对数尺度上具有相等带宽的不同频带上进行分析处理<sup>[4-5]</sup>。而图像的多分辨率分析方法与小波变换的处理机制十分相似,图像经多级小波分解后,形成了一系列对应于不同方向空间频率的子带图像,并且它们相互独立。因此,在小波变换的基础上进行图像质量评价将会得到更符合人类主观感知的评价结果。

基于以上分析,本文提出了基于小波加权的 SSIM 算法,其主要计算步骤如下:

(1)分别对原始图像和降质图像进行小波变换。研究表明,5~6 级小波分解更加符合人眼视觉特性,但过大的数据运算量抵消了其使用价值,因此,一般认为 4 级小波变换是一种兼顾计算复杂性和精确性的折中方案<sup>[6]</sup>。本文选取 sym8 小波对原始图像和降质图像分别进行二维 4 级小波变换,变换后各得到 13 个不同的频带。图 2 为 4 级小波分解示意图,从图中可见低频子图像 LL 被逐次分解,得到一系列分辨率逐次降低的次级子图像。其中 LL 子图像代表了图像的低频部分信息,包含了图像的绝大部分能量;LH 子图像反映了图像水平边缘的情况(水平方向低频,垂直方向高频);HL 子图像反映了图像垂直边缘的情况(水平方向高频,垂直方向低频);HH 子图像反映了图像中的沿对角线方向边缘情况,包括水平和垂直方向的高频细节<sup>[7-9]</sup>。

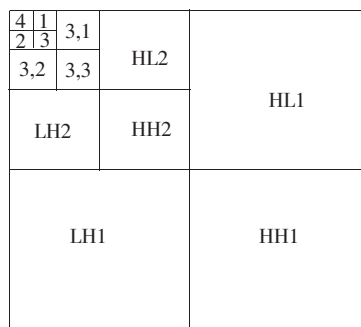


图 2 图像四级小波变换示意图  
Fig. 2 A four-scale wavelet transform

(2)运用 SSIM 算法分别计算经小波变换后原始图像和降质图像的各 13 个子带图像的结构相似度。子带图像的结构相似度算法包含 3 个部分,分别是亮度、对比度和结构相似度比较函数,计算方法如公式(1)~(3):亮度比较函数为:

$$l_j^{(i)}(x, y) = \frac{2\mu_x\mu_y + C_1}{\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1} \quad (1)$$

对比度比较函数为:

$$c_j^{(i)}(x, y) = \frac{2\sigma_x\sigma_y + C_2}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2} \quad (2)$$

结构相似度比较函数为:

$$s_j^{(i)}(x, y) = \frac{\sigma_{xy} + C_3}{\sigma_x^2\sigma_y^2 + C_3} \quad (3)$$

其中,  $j$  为小波分解级数,  $i$  为小波分解方向,  $\mu_x$  和  $\mu_y$  表示子图像  $x$  和  $y$  的平均灰度值,  $\sigma_x$  和  $\sigma_y$  分别表示子图像  $x$  和  $y$  的灰度标准差,  $\sigma_{xy}$  则表示子图像  $x$  和  $y$  之间的灰度协方差。  $C_1, C_2, C_3$  为很小的正数,防止分母为零或接近零造成的不稳定。将公式(1)~(3)中的 3 个比较函数相乘,得到各级子图像的小波结构相似度(wavelet structural similarity, WSSIM),定义为:

$$WSSIM_j^{(i)}(x, y) = [l_j^{(i)}(x, y)]^\alpha [c_j^{(i)}(x, y)]^\beta [s_j^{(i)}(x, y)]^\gamma \quad (4)$$

其中,参数  $\alpha > 0, \beta > 0, \gamma > 0$ ,主要用来调整 3 个部分的相对重要性,一般取  $\alpha = \beta = \gamma = 1$ 。

#### 3.2 加权因子计算

对于图像中空间、时间频率不同的部分,人类视觉系统具有不同的敏感程度。对比度敏感函数(contrast sensitivity function, CSF)曲线对不同的空间频率有不同的响应值,可以用来补偿空间频率过大或过小而造成的敏感度下降,所以选取 CSF 曲线的响应值作为加权值。CSF 函数曲线形式为<sup>[10-11]</sup>:

$$H(r) = 2.6 \times (0.0192 + 0.114r) \times \exp(-0.114r)^{1.1} \quad (5)$$

其中,  $r$  为空间频率。

考虑到目标像素点与周围局部区域内其他像素点之间的灰度值差异是影响视觉效果的主要因素,因此对图像空间频率的定义做了如下处理,对于给定的  $M \times N$  图像,行频定义为:

$$R_f = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{N-1} [f(i, j) - f(i, j-1)]^2} \quad (6)$$

列频定义为:

$$C_f = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=1}^N [f(i,j) - f(i-1,j)]^2} \quad (7)$$

空间频率定义为:

$$r = \sqrt{R_f^2 + C_f^2} \quad (8)$$

当  $R_f=0$  或  $C_f=0$ , 则  $r=C_f$  或  $r=R_f$ , 得到垂直或水平方向的 CSF 曲线, 曲线形式与公式 (5) 相同。当  $R_f=C_f$ , 得到的即为对角线方向的空间频率  $r_d=\sqrt{2} \times R_f$ , 代入公式 (5) 得到对角线方向的 CSF 曲线, 定义为:

$$H(r) = 2.6 \times (0.0192 + 0.114 \times \sqrt{2}R_f) \times \exp(- (0.114 \times \sqrt{2}R_f)^{1.1}) \quad (9)$$

对于 4 级小波分解, 整幅图像划分为 13 个频带, 将 CSF 函数曲线分为 5 个频带 (HL 和 LH 看作同一频带处理), 加权值为在相应频带内 CSF 响应的平均值。设低频部分的权值为 1, 这是因为

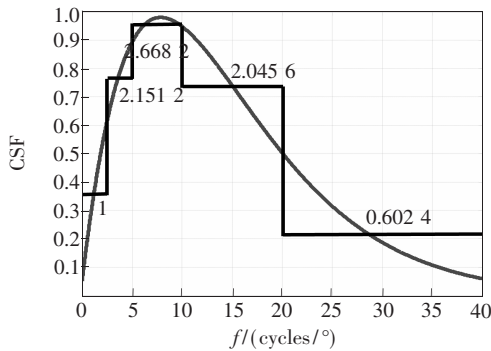


图 3 水平或垂直方向带有加权值的 CSF 特性曲线  
Fig. 3 Weighted CSF curve in LH/HL direction

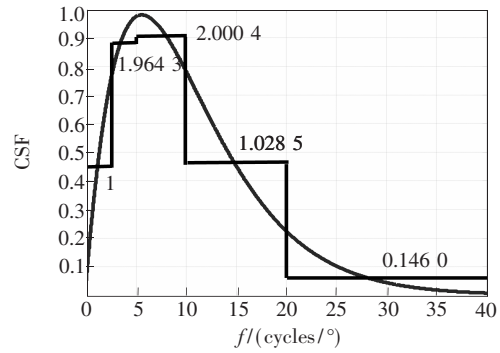


图 4 对角线方向带有加权值的 CSF 特性曲线  
Fig. 4 Weighted CSF curve in HH direction

低频部分主要包括大面积的平滑区域, 形成了图像的基本灰度等级。其他部分权值为各自的平均值与低频部分平均值相除的结果。图 3 和图 4 分别给出了水平或垂直和对角线方向的 CSF 曲线加权值。

从图 3 和图 4 中可以看出, CSF 曲线加权值在中频部分数值较高, 这是因为中频部分形成了图像的主要边缘, 决定了图像的基本内容和结构, 对图像质量评价结果影响较大。CSF 曲线加权值在高频部分的数值较低, 因为高频成分形成图像的次要边缘和细节, 可以认为是对主要边缘的进一步补充细化, 对图像质量影响不大。

通过对公式 (4) 计算得到的 13 个子带图像的 WSSIM 值进行加权计算, 最终通过求和平均得到归一化的小波加权结构相似度 (WWSSIM) 评价结果, 如公式 (10):

$$WWSSIM = \frac{\sum_{(i)} \sum_{j=1}^4 W_{CSF}^{(i)}(j) \times WSSIM_j^{(i)}(x,y) + W_{CSF}^{(LL)}(4) \times WSSIM_4^{LL}(x,y)}{\sum_{(i)} \sum_{j=1}^4 W_{CSF}^{(i)}(j) + W_{CSF}^{(LL)}(4)} \quad (10)$$

(i) = {HL, LH, HH}

## 4 实验结果分析

### 4.1 标准数据库图像质量评价

图 5 是 LIVE 图像数据库提供的高清图像和 5 种类型的降质图像。其中 (a) 是原始图像, (b)~(f) 分别是 JPG 压缩、JPG2000 压缩、高斯模糊、高斯噪声、快速衰减降质图像。

分别使用传统的客观图像质量评价方法

MSE、PSNR、结构相似度 SSIM 算法和本文提出的小波加权 WWSSIM 算法对图 5 中的图像质量进行评价, 评价结果在表 1 中给出。

从人类主观感受出发, 图 5 中图像质量按图像编号 (e)-(f)-(d)-(c)-(b) 的顺序逐渐下降, MSE 的值应该逐渐增大, PSNR、SSIM、WWSSIM 的值应该逐渐减小。但是从表 1 中可以看出, MSE、PSNR、SSIM 算法的评价结果都出现了与

表 1 不同类型降质图像评价结果

Table 1 Different types of images quality assessment

Methods	图像质量评估值				
	图 5(b)	图 5(c)	图 5(d)	图 5(e)	图 5(f)
MSE	174.978	117.149	58.188	26.813	46.474
PSNR	25.701	27.443	30.482	33.847	31.458
SSIM	0.836	0.869	0.953	0.948	0.968
WWSSIM	0.739	0.781	0.832	0.966	0.869

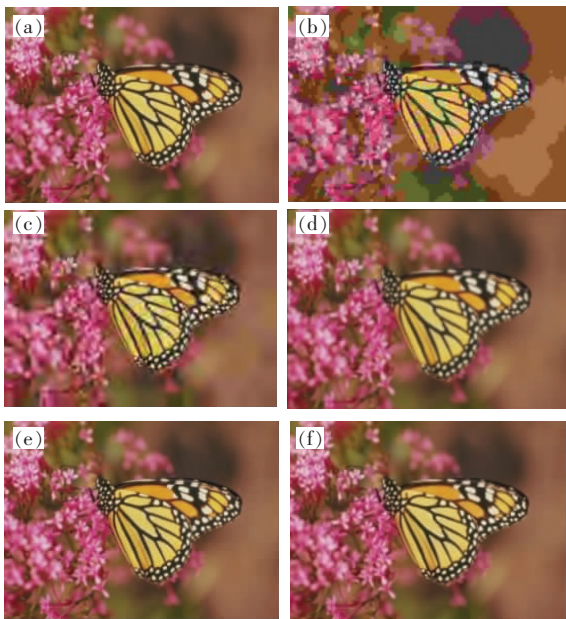


图 5 Live 数据库中一组失真 monarch 图像。(a)原始图像,(b) JPEG,(c) JPEG2000,(d)高斯模糊,(e)高斯噪声,(f)快速衰减。

Fig. 5 Monarch images with different types of distortions. (a) Original image, (b) JPEG, (c) JPEG2000, (d) Gaussian blur, (e) White noise, (f) Fast fading.

主观评价不一致的情况,而 WWSSIM 的结果更符合人眼主观感知,评价结果更加准确。

散点图是一种直观分析客观图像质量评价算法的评定方法。每一个点代表一幅测试图像,其横坐标代表客观图像质量评价算法的评价值,纵坐标代表相应的主观评价 DMOS 值。理想情况下,评价值和 DMOS 值有一一对应的关系,表现在散点图上是一条直线或在一定非线性范围内的曲线。但是一般情况下各评价方法获得的图像客观质量评价与 DMOS 值并不是成线性关系的。因此,为了比较图像客观质量与主观质量的评价

一致性,采用多参数非线性方程对客观质量与主观质量进行拟合,使拟合后的图像客观质量 Quality(x)与 DMOS 值的关系近似线性以便评价算法。VQEG Phase II 给出的拟合函数形式为:

$$\text{Quality}(x) = \frac{\beta_1 - \beta_2}{1 + e^{-\left(\frac{x - \beta_3}{\beta_4}\right)}} + \beta_2 \quad (11)$$

图 6 给出了 PSNR、SSIM 和 WWSSIM 算法的散点图,散点图越收敛到一条直线或曲线附近,表明算法越有效。从图中可以看出 WWSSIM 算法的 DMOS 散点图与其他 3 种算法的散点图相比更趋近于一条曲线,经过线性拟合的 DMOS 散点图更趋近于一条直线,这说明本文的算法更加准确。

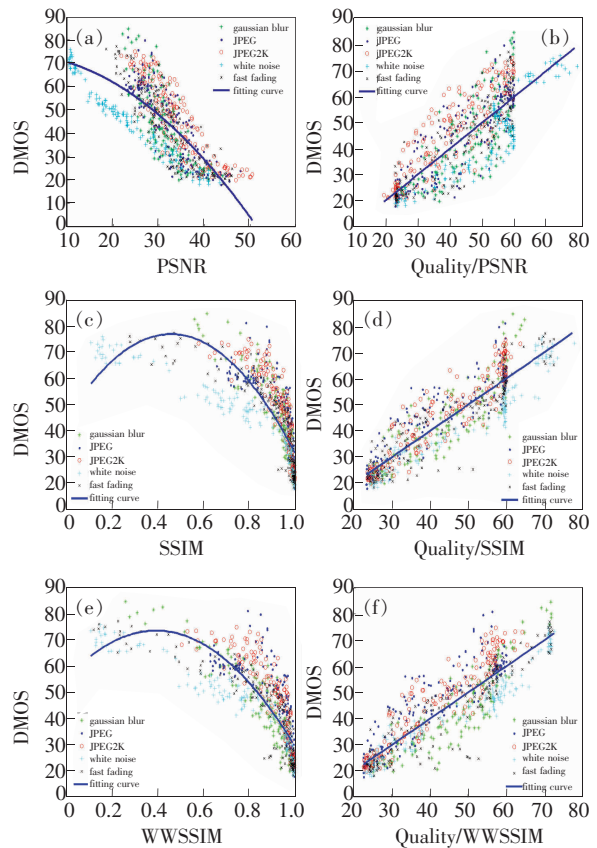


图 6 主观评价散点图

Fig. 6 Scatter plots of DMOS

VQEG 给出的另一种基于统计学的定量评价标准包括线性相关系数 (Correlation Coefficients, CC)、均方根误差 (Root Mean Square Error, RMSE)、平均绝对误差 (Mean Absolute Error, MAE) 和误点率 (Outlier Ratio, OR)。CC

的值越大,说明模型的预测质量值与 DMOS 相关性越好。RMSE、MAE 的值越小,说明模型的预测误差越小,准确率越高。OR 的值越小说明误点率越小,一致性更高。表 2 是 PSNR、SSIM 和 WWSSIM 算法的评价指标值。

表 2 图像客观质量评价指标

Table 2 Objective quality assessment

Methods	CC	MAE	RMSE	OR
PSNR	0.871 6	7.361 3	9.290 9	0.041 8
SSIM	0.915 7	5.720 4	7.466 9	0.003 9
WWSSIM	0.916 9	5.561 5	7.124 2	0.001 3

从表 2 中可以看出,WWSSIM 算法的 CC 值最大, RMSE、MAE 和 OR 值最小,更能准确地反映人眼主观评价。与 PSNR 相比,提出的 WWSSIM 算法在准确率上提高了 5.2%,在一致性上提高了 4.1%。与 SSIM 算法相比,WWSSIM 算法在准确率上提高了 2.9%,在一致性上提高了 2.6%。

#### 4.2 激光干扰图像质量评价

为了验证本文提出的 WWSSIM 算法对激光

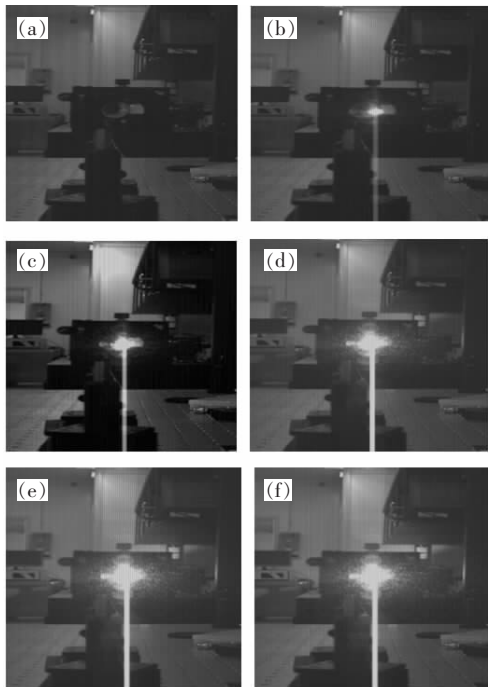


图 7 激光干扰图像。(a) 0 mW, (b) 250 mW, (c) 260 mW, (d) 280 mW, (e) 290 mW, (f) 300 mW.

Fig. 7 Laser dazzling images. (a) 0 mW, (b) 250 mW, (c) 260 mW, (d) 280 mW, (e) 290 mW, (f) 300 mW.

干扰图像评价的有效性,在实验中采集了一组激光干扰功率不同和背景强度不同的干扰图像,如图 7 所示。其中(a)为原始图像,(b)~(f)为激光干扰图,激光干扰功率逐渐增强,其中图(c)的背景强度与原始图像不同。

运用基于结构相似度 SSIM 算法和本文提出的小波加权结构相似度 WWSSIM 算法对图 7 中的激光干扰图像进行评价,评价结果见表 3。

表 3 不同强度激光干扰图像评价结果

Table 3 Laser dazzling images quality assessment

Methods	图像质量评估值				
	图 7(b)	图 7(c)	图 7(d)	图 7(e)	图 7(f)
SSIM	0.979 5	0.862 2	0.898 2	0.859 7	0.851 8
WWSSIM	0.927 2	0.826 1	0.820 0	0.802 0	0.795 5

随着激光功率的逐渐增强,图像质量进一步下降,SSIM、WWSSIM 值逐渐减小。从表 3 结果可以看出,除图(c)外,评价量 SSIM 都能给出合理的结果。但是由于图(c)的背景强度与原始图像的不一致,SSIM 评价方法认为图(d)的质量好于图(c),这与人眼主观感知不符,该算法无法给出正确的评价结果。本文所提出的 WWSSIM 评价方法能够克服背景强度不一致对评价结果的影响,认为图(c)的质量好于图(d),与人眼主观感知相符,评价结果更加准确。

基于小波加权的 WWSSIM 方法对图像进行小波变换,体现了多分辨率的思想,反映出图像的边缘和框架结构,凸显了图像的细节信息。同时,对不同空间频率的区域采用不同的加权值,很好地结合了人类视觉系统的特性。通过对 Live 标准数据库图像和激光干扰图像的评价,可以看出 WWSSIM 算法的评价结果与主观感知具有较高一致性。

## 5 结 论

激光干扰光电系统使其成像元件达到饱和或损伤,使其无法辨别获取图像中的准确信息,因此可以通过评价获取图像的质量来评估激光的干扰效果。传统的客观图像质量评价方法 MSE、PSNR 是基于像素灰度值的误差来评价图像质量的,对于背景灰度变化较大,但细节信息损失较小的图像评价结果不太准确。SSIM 算法基于图像

的整体结构失真来评价图像,对于激光干扰图像这种局部严重失真图像的评价结果与主观感知有时不一致。本文提出了一种新的基于小波加权的结构相似度(WWSSIM)评价算法。通过对 Live 数据库图像质量的评价,WWSSIM 算法与 PSNR 相比在准确率上提高了 5.2%,在一致性上提高了 4.1%。WWSSIM 算法与 SSIM 算法相比在

准确率上提高了 2.9%,在一致性上提高了 2.6%。表明本文提出的 WWSSIM 算法相对于 MSE、PSNR 和 SSIM 算法在准确性和一致性上都有提高。通过对实验中采集的激光干扰图像质量的评价,表明 WWSSIM 算法可以克服背景强度不一致对图像质量的影响,评价结果更符合人眼的主观感知,能更确切地反映激光干扰的效果。

#### 参 考 文 献:

- [ 1 ] Sheikh H R, Bovik A C. Image information and visual quality [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006,15(2):430-444.
- [ 2 ] Wang Z. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004,13(4):600-612.
- [ 3 ] Wang Z, Simoncelli E P, Bovik A C. Multi-scale structural similarity for image quality assessment [C]//*IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, New York: IEEE Press, 2003:1-4.
- [ 4 ] Wang Z, Simoncelli E. Stimulus synthesis for efficient evaluation and refinement of perceptual image quality metrics [C]//*Electronic Imaging International Society for Optics and Photonics*, Washington: SPIE, 2004:99-108.
- [ 5 ] Ma Lin, Li Songnan, Ngan K N. Visual horizontal effect for image quality assessment [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing Letters*, 2010,17(7):627-628.
- [ 6 ] Huang K, Wu Z, Fung G S K, et al. Color image denoising with wavelet thresholding based on human visual system model [J]. *Signal Processing: Image Communication*, 2005,20(2):115-127.
- [ 7 ] Daubechies I, Swelden W. Factoring wavelet transforms into lifting steps [J]. *J. Fourier Analysis and Applications*, 1998,4(3):247-269.
- [ 8 ] Chandler D M, Hemami S S. A wavelet based visual signal-to-noise ratio for natural images [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2007,16(9):2284-2298.
- [ 9 ] Tsai M J, Shen C H. Wavelet tree group modulation (WTGM) or digital image watermarking [C]//*IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, New York: IEEE, 2007:173-176.
- [10] Mannos J, Sakrison D. The effects of a visual fidelity criterion on the encoding of image [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1974, 20(7):527-528.
- [11] Madenaus M J, Reichel J, Kunt M. Wavelet-based color image compression: exploiting the contrast sensitivity function [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2003,12(1):58-69.