文章编号:1001-5078(2017)03-0352-05

·光电对抗·

基于图像特征相关度的激光干扰卫星效果评估

张 阳,刘湘伟,郝成民
(电子工程学院,安徽 合肥 230037)

摘 要:针对激光干扰光学成像卫星效果难以评估的问题,借鉴图像处理相关理论,将干扰前后卫星图像特征相关度作为评估指标,并采用HVS(人眼视觉系统)对指标进行修正,利用基于一致相邻度熵权的综合赋权方法,建立激光干扰效果综合评估模型。运用模型对受激光干扰条件下的卫星图像进行评估,得到的结论既能客观地反映激光干扰的实际效果,又能与人的主观感受保持较好的一致性,验证了模型在激光干扰光学成像卫星效果评估方面的适用性和科学性。

关键词:图像特征相关度;一致相邻度熵权;人眼视觉系统;激光干扰卫星图像效果评估
中图分类号:TN977 **文献标识码**:A **DOI**:10.3969/j.issn.1001-5078.2017.03.019

Effect evaluation of laser jammed satellite based on correlation degree of image feature

ZHANG Yang, LIU Xiang-wei, HAO Cheng-min
(Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

Abstract: In view of the problem that the effect of laser jammed optical imaging satellite is difficult to evaluate, the correlation degree of the satellite images before and after the jamming is used as the evaluation index, and the index is modified by HVS (human visual system). Using the comprehensive weighting method based on consistent adjacent degree entropy, the comprehensive evaluation model of laser jamming effect is established. The satellite images under laser jamming are evaluated through the model. The results show that this method can objectively reflect the actual effect of laser interference and keep a good consistency with the subjective feelings of the people. The applicability of the model is verified in the evaluation of laser jammed optical imaging satellite.

Key words: correlation degree of the image feature; consistent adjacent entropy weight; HVS; effect evaluation of laser jamming satellite

1 引 言

激光对光学成像卫星干扰效果的评估是光电对抗领域的难点,目前关于激光干扰光学成像卫星效果评估的研究主要有两种思路:一种是从工程器件的角度,分析激光对星载CCD探测器的损伤程度[1-3],但激光干扰光学成像卫星效果的评估,主要判断标准是人能否在受干扰的卫星图像中识别出目标,因此,仅从工程器件层面得出的评

作者简介:张 阳(1991-),男,硕士研究生,主要研究方向为光电对抗。E-mail:bzzwtzz@sina.com
收稿日期:2016-07-12;修订日期:2016-08-19

估结论不够直观且会与读图员的主观评价存在一定的偏差;另一种是采用专家评分的方法,专家依据经验对干扰效果进行评估[4-5],但单纯的主观评价消耗人力、物力和时间,效率较低,且评估结果不稳定,存在个体差异。分析受干扰卫星图像,最显著直观的干扰效果就是图像质量的下降,因此,本文采用基于模拟人类视觉系统(HVS)的图像特征相关度评价模型建立评估指标体系,同时,采用基于一致相邻度熵权的综合赋权模型进行指标融合,得到的激光干扰卫星图像效果评估模型既能与主观感受保持较好的一致性,又能客观地反映激光干扰的实际效果。

2 基于 HVS 图像特征相关度的激光干扰效果评估指标

选取亮度、对比度和锐度三个指标建立图像可识别度模型用以表示图像的特征,再利用干扰前后图像可识别度的变化建立图像特征相关度模型,用干扰前后图像特征相关度建立激光干扰效果评估指标。

2.1 基于 HVS 的图像可识别度模型

计算机在进行图像处理时,将图像分解为 M 个像素,以灰度值 $I(x,y)$ 的形式记录图像的特征[6],这种处理方法虽然能够反映图像最细微的变化,但工作量较大且不能直观地反映人对图像变化的主观判断,因此在现代图像处理学中,用人的主观评价指标(如亮度、对比度和锐度等)来表示图像的特征,同时又将这些主观评价指标用灰度值表示,建立图像可识别度模型:

(1)亮度 $L(x,y)$

图像的"暗"或"亮"会影响人眼对图像的进一步识别,过"亮"、过"暗"都会影响图像识别,因此定义亮度为:

$$L(x,y)=\lg I(x,y) \tag{1}$$

(2)对比度 $C(x,y)$

人眼要从整幅图像中识别出目标,依赖于目标与背景的相对亮度变化,称之为对比度。利用单个像素的灰度值相对于整幅图像的平均灰度值来表示:

$$C(x,y)=\frac{I(x,y)}{\mu[I(x,y)]} \tag{2}$$

式中,$\mu[I(x,y)]$ 表示整幅图像的平均灰度值。

$$\mu[I(x,y)]=\frac{\sum_{i=1}^{M}[I(x,y)]}{M} \tag{3}$$

(3)锐度 $D(x,y)$

锐度即目标的边缘清晰度,目标的边缘是目标的像素灰度值发生变化的地方,图像的灰度梯度反映了图像灰度变化的大小和方向[7],梯度定义为:

$$\nabla I(x,y)=\begin{bmatrix}G_x\\G_y\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\frac{\partial I}{\partial x}\\\frac{\partial I}{\partial y}\end{bmatrix} \tag{4}$$

梯度的幅度值越大,表明目标的边缘越清晰,目标的锐度越高,越容易识别。定义锐度为:

$$D(x,y)=\sqrt{G_x^2+G_y^2} \tag{5}$$

人类视觉系统(Human Visual System,HVS)在处理一幅图像时,对于目标点以及其周边位置的像素点的空间和频率分辨率都是比较高的,而远离目标点的分辨率较低。用 $e(x,y)$ 表示从图像中任一点 (x,y) 到目标点 (x_0,y_0) 的相对距离:

$$e(x,y)=\frac{\sqrt{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2}}{d_{\max}} \tag{6}$$

式中,$d_{\max}$ 表示所有像素点到目标点距离的最大值。

定义 HVS 修正因子 $V(x,y)$ 为:

$$V(x,y)=\frac{e_c}{e_c+e(x,y)} \tag{7}$$

式中,e_c 为根据实验拟合得到的常量[8],$e_c=2.3$。

则基于 HVS 的图像可识别度模型为:

$$\begin{cases}L^V(x,y)=V(x,y)\cdot L(x,y)\\C^V(x,y)=V(x,y)\cdot C(x,y)\\D^V(x,y)=V(x,y)\cdot D(x,y)\end{cases} \tag{8}$$

2.2 基于 HVS 的图像特征相关度模型

图像特征相关度是指待评图像与原始图像之间某一图像特征的相似程度[9],在基于 HVS 的图像可识别度模型的基础上,分别建立图像亮度相关度模型、图像对比度相关度模型以及图像锐度相关度模型。

(1)图像亮度相关度模型

光学成像卫星受到光电干扰时,图像的亮度会发生变化,对干扰导致图像亮度的变化进行定量描述,建立图像亮度相关度模型:

$$l_{oj}^{v}=\frac{\sum_{x=1}^{M}\sum_{y=1}^{N}L_{o}^{V}(x,y)L_{j}^{V}(x,y)}{\sqrt{\sum_{x=1}^{M}\sum_{y=1}^{N}[L_{o}^{V}(x,y)]^{2}\sum_{x=1}^{M}\sum_{y=1}^{N}[L_{j}^{V}(x,y)]^{2}}} \tag{9}$$

式中，$L_{o}^{V}(x,y)$、$L_{j}^{V}(x,y)$ 分别表示考虑人眼识别特性的原图像和干扰后图像的亮度。

(2)图像对比度相关度模型

干扰后图像中的目标“淹没”在背景中，使得人眼无法分辨出目标，定量描述图像对比度的变化，建立图像对比度相关度模型：

$$c_{oj}^{v}=\frac{\sum_{x=1}^{M}\sum_{y=1}^{N}C_{o}^{V}(x,y)C_{j}^{V}(x,y)}{\sqrt{\sum_{x=1}^{M}\sum_{y=1}^{N}[C_{o}^{V}(x,y)]^{2}\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N}[C_{j}^{V}(x,y)]^{2}}} \tag{10}$$

式中，$C_{o}^{V}(x,y)$、$C_{j}^{V}(x,y)$ 分别表示考虑人眼识别特性的原图像和干扰后图像的对比度。

(3)图像锐度相关度模型

人眼对图像可识别度的直观感受是图像“模糊”了，即目标的边缘清晰度下降，对干扰造成的图像锐度的变化进行定量分析，建立图像锐度相关度模型：

$$d_{oj}^{v}=\frac{\sum_{x=1}^{M}\sum_{y=1}^{N}D_{o}^{V}(x,y)D_{j}^{V}(x,y)}{\sqrt{\sum_{x=1}^{M}\sum_{y=1}^{N}[D_{o}^{V}(x,y)]^{2}\sum_{x=1}^{M}\sum_{y=1}^{N}[D_{j}^{V}(x,y)]^{2}}} \tag{11}$$

式中，$D_{o}^{V}(x,y)$、$D_{j}^{V}(x,y)$ 分别表示考虑人眼识别特性的原图像和干扰后图像的锐度。

利用基于 HVS 的图像特征相关度模型建立图像亮度相关度、对比度相关度和锐度相关度三个干扰效果评估指标，通过衡量卫星受干扰时的图像与原始图像之间的相关度，可以有效地评估激光干扰效果。相关度的取值范围为[0,1]，值越大表示两幅图像的相似程度越高，间接表明干扰效果越不明显，相反地，相关度越小表明干扰效果越好。

3 基于一致相邻度熵权的综合赋权模型

为了客观全面地评价干扰效果，需确定各个图像特征相关度指标在激光干扰效果评估中所占的权重。基于一致相邻度熵权的赋权方法是一种主客观综合的赋权法，既能较好地反映各个指标对结果影响的客观情况，又可以体现读图人员的主观评价。

3.1 基于一致相邻权的主观权重模型

在待评估的目标集 $O=\{o_1,o_2,\cdots,o_m\}$ 中，$o_i\succ o_j$ 表示 o_i 比 o_j 更重要。定义 $\beta_{i,i+1}$ 为相邻权，用以衡量相邻目标间的相对重要性的模糊标度值。则目标关于主观偏好有以下三种情况：

(1)当 $o_i\succ o_j$ 时，对应有 $0.5<\beta_{ij}\leqslant 1$，表示 o_i 比 o_j 更重要；

(2)当 $o_i\prec o_j$ 时，对应有 $0<\beta_{ij}\leqslant 0.5$，表示 o_j 比 o_i 更重要；

(3)当 $o_i\sim o_j$ 时，对应有 $\beta_{ij}=0.5$，表示两者一样重要。

若假设所有目标满足一致性原则的权重排序为 $o_1\succ o_2\succ\cdots\succ o_m$，则有递推式：

$$\beta_{i,i+2}=\beta_{i,i+1}+2(1-\beta_{i,i+1})(\beta_{i+1,i+2}-0.5) \tag{12}$$

由递推式通过相邻权可以求得任意两个目标之间的相对重要性模糊度值。则可以得到目标相对重要性的比较矩阵：

$$\overrightarrow{\beta}=\begin{pmatrix}\beta_{11} & \cdots K & \beta_{1m}\\ \vdots & \vdots & \vdots\\ \beta_{m1} & \cdots & \beta_{mm}\end{pmatrix} \tag{13}$$

下三角元素可以由 $\beta_{ji}=1-\beta_{ij}$ 求得。则矩阵 $\overrightarrow{\beta}$ 每行模糊标度值之和(不包括自身比较)就是目标 o_i 的非归一化的主观权重：

$$\omega_i^{*}=\sum_{j=1}^{m}\beta_{ij}\qquad(i=1,2,\cdots,m;i\neq j) \tag{14}$$

归一化处理：

$$\omega_i=\frac{\omega_i^{*}}{\sum_{i=1}^{m}\omega_i^{*}}\qquad(i=1,2,\cdots,m) \tag{15}$$

则目标集 $O=\{o_1,o_2,\cdots,o_m\}$ 的权重向量：

$$\omega=(\omega_1,\omega_2,\cdots,\omega_m)^{T} \tag{16}$$

3.2 基于熵权的客观权重模型

运用信息熵原理确定的熵权系数并不表示各指标的实际重要性，而是反映各指标提供给决策者的信息量的相对多少。当各个待评对象的某一指标值的熵相差越小，说明该项指标对待评对象的变化不敏感，其权重也就越小，极端情况下某个评价指标评估所有的目标具有相同的结果，则认为这个指标起到的作用可忽略。

设有 n 个待评对象，m 个评估指标，则评价矩

阵 D：

$$D = \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_n \end{matrix} \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nm} \end{bmatrix} \tag{17}$$

则待评对象关于评估指标 j 的熵定义为：

$$E_j = -k\sum_{i=1}^{n} p_{ij}\ln p_{ij} \tag{18}$$

式中，

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^{n} x_{ij}}$$

$$k = \frac{1}{\ln n}$$

计算各指标的熵权，第 j 个指标的熵权定义为：

$$\theta_j = \frac{1 - E_j}{m - \sum_{j=1}^{m} E_j} \quad (j = 1,2,\cdots,m) \tag{19}$$

3.3 主客观综合权重模型

将利用一致相邻权模型求得的主观权重 ω 与利用熵权法求得的客观权重 θ 相结合，得到综合权重 ω_j^0 为：

$$\omega_j^0 = \frac{\theta_j\omega_j}{\sum_{j=1}^{m} \theta_j\omega_j} \tag{20}$$

基于一致相邻度熵权的综合赋权模型既利用专家给出的各个指标的重要程度，又充分考虑了各指标本身所包含的信息程度，使得最后的综合权重既能与主观感受保持良好的一致性，又能客观地反映问题的真实情况。

4 基于一致相邻度熵权 HVS 的干扰效果综合评估模型

根据读图员的主观偏好以及各项可识别度指标对图像识别的客观影响，利用基于一致相邻度熵权的综合赋权模型赋予亮度相关度、对比度相关度和锐度相关度的权重值分别为 α、β、γ，建立基于一致相邻度熵权的 HVS 干扰效果综合评估模型为：

$$F_J^V = 1 - (l_{oj}^v)^{\alpha}(c_{oj}^v)^{\beta}(d_{oj}^v)^{\gamma} \tag{21}$$

5 干扰效果评估实例

图 1(a)为光学成像卫星拍摄的图像，图 1(b) ~ 图 1(d)为在不同激光干扰功率、不同干扰时长条件下卫星拍摄的图像。则干扰图像的各特征相关度值见表 1。

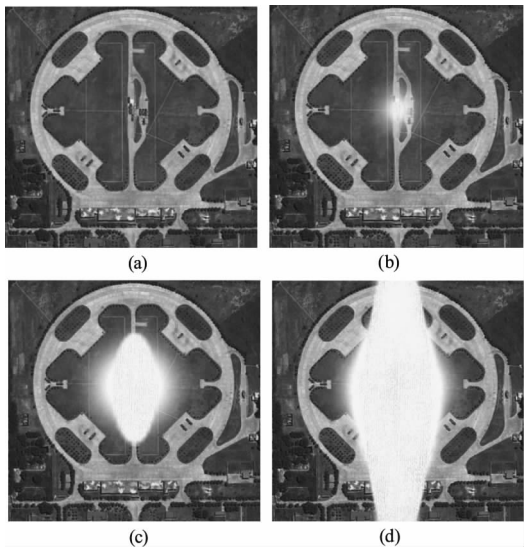


图 1 不同激光干扰条件下光学成像卫星拍摄图像

Fig. 1 Optical imaging satellite images under different laser jamming conditions

表 1 干扰图像特征相关度

Tab. 1 Characteristic correlation of interference image

干扰图像	图像特征相关度		
	图像亮度相关度 o_1	图像对比度相关度 o_2	图像锐度相关度 o_3
图 1(b)	0.91	0.88	0.78
图 1(c)	0.53	0.46	0.38
图 1(d)	0.21	0.29	0.13

在对图像识别中，读图专家给出的图像特征相关度的重要性排序为 $o_3 > o_2 \sim o_1$，重要程度的划分等级与模糊度的对应关系见表 2。

表 2 重要等级与模糊度值对应关系

Tab. 2 the relationship between the important level and the value of the fuzzy degree

重要程度等级	同样重要	略为重要	明显重要	十分重要
模糊度值	0 ~ 0.3	0.3 ~ 0.6	0.6 ~ 0.9	0.9 ~ 1

对相邻目标的重要程度进行比较，认为 o_3 比 o_2 和 o_1 的重要性在同样重要与略为重要之间，则图像各特征相关度相对重要性比较矩阵为：

$$\overrightarrow{\beta} = \begin{pmatrix} 0.5 & 0.5 & 0.475 \\ 0.5 & 0.5 & 0.475 \\ 0.525 & 0.525 & 0.5 \end{pmatrix}$$

则根据式(15)、(16)，得到主观权重向量为：

$\omega = (0.33 \quad 0.33 \quad 0.34)^T$

根据式(19)得到熵值为：

$E = (0.996 \quad 0.971 \quad 0.984)$

又根据式(20),得到客观权重向量为:

θ = (0.082 0.592 0.327)

分析主观权重和客观权重,对重要程度的判定并不一致,比如图像亮度相关度 o_1 与图像对比度相关度 o_2 在主观评价中认为两者的重要性相同,但由于两个指标所包含的信息量不同,其客观权重差异较大,这也是采用主客观综合赋权模型的优越性。

则根据式(21),得到综合权重为:

(α β γ) = (0.081 0.586 0.333)

干扰效果的评估等级与模糊度值的对应关系见表3。

表3 干扰效果等级与模糊度值对应关系

Tab. 3 The corresponding relationship between the jamming effect level and the fuzzy degree

干扰效果等级	效果较差	效果一般	效果好	效果极好
模糊度值	0~0.3	0.3~0.6	0.6~0.9	0.9~1

则卫星图像激光干扰效果的评估结论见表4。

表4 卫星图像激光干扰效果的评估结论

Tab. 4 Evaluation results of laser jamming effect on satellite images

干扰图像	干扰效果综合评定值	干扰效果结论
图1(b)	0.152	效果较差
图1(c)	0.563	效果一般
图1(d)	0.784	效果好

分析评估结论,运用基于一致相邻度熵权的HVS干扰效果综合评估模型得到的结果既与读图员的主观感受具有较高的一致性,又能客观地反映激光干扰的实际效果。

6 结 论

借鉴图像处理方面的相关理论,建立了基于一致相邻度熵权HVS的综合评估模型来评估激光对光学成像卫星的干扰效果,模型影响因素可控,能够消除人为干扰,增强了评估结论的可信度。通过对模型的运用,验证了模型的有效性和适用性。

参考文献:

[1] QIU Dongdong, ZHANG Zhen, WANG Rui. Mechanism research of pulsed-laser induced damage to CCD Imaging devices[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(2): 136 – 140. (in Chinese)
邱冬冬,张震,王睿. 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):136 – 140.

[2] 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. (in Chinese)
牛燕熊,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.

[3] ZHU Zhiwu. Short pulsed laser induced damage to visible light CCD and optical filter module[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013. (in Chinese)
朱志武. 短脉冲激光对可见光CCD及滤光片组件的损伤效应研究[D]. 长沙:国防科技大学,2013.

[4] SUN Yunqiang, CHENG Xiangai, WANG Fei. Method of quality evaluation aimed laser disturbing image[J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(5): 659 – 662. (in Chinese)
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.

[5] WANG Shiyong. Study on laser-induced CCD detector vulnerability and survivability and fussy synthetic fvaluation on CCD jamming effects[D]. Changchun: Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2002. (in Chinese)
王世勇. 激光干扰对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.

[6] LIU Yanyan, ZHAO Yingchao, HU Tao. Quality assessment of laser disturbing images based on wavelet transform[J]. Laser and Optoelectronics Progress, 2012, 49(11): 1 – 7. (in Chinese)
刘严严,赵英超,胡涛. 基于小波变换的激光干扰图像质量评价[J]. 激光与光电子学进展,2012,49(11):1 – 7.

[7] ZENG Jun. Research on image edge detection and its application[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011. (in Chinese)
曾俊. 图像边缘检测技术及其应用研究[D]. 武汉:华中科技大学,2011.

[8] Wang Z, Lu L G, Bovik A C. Foveation scalable video coding with automatic fixation selection[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2003, 12(2): 243 – 254.

[9] LIU Bo. Structural similarity image quality assessment method[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012. (in Chinese)
刘博. 结构相似性图像质量评价方法研究[D]. 大连:大连理工大学,2012.