一种基于改进量化表的 JPEG 图像压缩算法

张雅媛，孔令罔
（武汉大学，武汉 430079）

摘要：目的 结合人眼视觉特性，研究一种基于改进量化表的 JPEG 图像压缩算法(JPEG-HVS)。**方法** 利用人眼亮度对比度敏感函数（CSF）生成一种新的量化表，来代替传统 JPEG 标准推荐的亮度量化表，并通过 Matlab7.0 对不同种类图像进行了仿真实验。通过计算不同种类图像的压缩质量评价指标，将提出的压缩算法与传统 JPEG 压缩算法及 JPEG 区域法进行对比。**结果** JPEG-HVS 实现的压缩比比 JPEG 实现的压缩比平均高出 53.56%，比 JPEG 区域法平均高出 18.75%。3 种压缩方法的峰值信噪比(PSNR)波动不大，JPEG 的 PSNR 值最大，JPEG-HVS 次之，平均结构相似度(MSSIM) 从大到小排列依次为 JPEG>JPEG-HVS>JPEG 区域法。JPEG-HVS 编解码所需时间要明显少于 JPEG。同时依靠主观评价可以发现，经 JPEG-HVS 解压的重构图像仍具有良好的视觉特性。**结论** 在保证了压缩质量的同时，提出的 JPEG-HVS 压缩算法相比于传统 JPEG 压缩算法、JPEG 区域法，可以实现更大的压缩比和更快的编解码速度，更有利于图像的存储与传输。

关键词：JPEG；量化表；人眼对比度敏感函数；图像质量评价
中图分类号：TS801.3 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3563(2016)13-0189-06

An Algorithm of JPEG Image Compression Based on Improved Quantization Table

ZHANG Ya-yuan, KONG Ling-wang
(Wuhan University, Wuhan 430079, China)

ABSTRACT: JPEG image compression algorithm (JPEG-HVS) was studied based on improved quantization table combined with characteristics of Human Vision System. It calculated a new kind of quantization table according to the human visual luminance contrast sensitivity function and used it to take place of the luminance quantization table form JPEG standard, and carried out the simulation experiment on different classes of images via Matlab7.0. By comparison, the JPEG-HVS had a better compression ratio, 53.56% higher than the traditional JPEG compression algorithm and 18.75% higher than the JPEG zone method. The difference of peak-signal-to-noise ratio (PSNR) among the three was very small, i.e. JPEG>JPEG-HVS>JPEG zone method. The mean structural similarity index measure (MSSIM) of the three was JPEG>JPEG-HVS>JPEG zone method. The time of coding and decoding of JPEG-HVS was far less than that of JPEG. Meanwhile, images decompressed by JPEG-HVS still had a good visual effect by observation. Compared with the other two, with the quality of compression image guaranteed at the same degree, the JPEG-HVS can reach higher compression ratio and faster coding and decoding, which will benefit the storage and transmission of images.

收稿日期：2015-11-02
基金项目：中央高校基本科研基金（专项）（2042015gf008）；国防科工局十二五技术基础（GSGC 2013 207CJ13）
作者简介：张雅媛（1992—），女，浙江台州人，武汉大学硕士生，主攻色彩信号处理。
通讯作者：孔令罔（1972—），男，江苏泰州人，博士，武汉大学副教授、硕士生导师，主要研究方向为色彩表示理论与再现技术。

KEY WORDS: JPEG; quantization table; CSF; image quality assessment

随着多媒体计算机技术的不断发展，人们面对的各种数据量剧增，数据压缩技术的研究也越来越受到重视，因此也催生出了大量针对数字图像的压缩编码算法。据统计，目前已有 30~40 多种图像压缩编码算法问世。在分类上，也存在几种不同的方法。根据对编码信息的恢复程度不同，图像压缩编码可分为无损压缩编码和有损压缩编码。其中 JPEG 图像压缩算法是一种综合使用无损和有损压缩算法的综合性压缩算法，同时也是静止图像压缩的国际标准，被广泛应用于互联网和数码相机领域，网站上 80%的图像都采用了 JPEG 压缩标准[1—3]。JPEG 压缩算法的核心就在于量化，简单地理解，就是降低整数精度以减少存储所需要的位数，从而达到数据压缩目的的过程，也是 JPEG 压缩过程中唯一的信息损失的来源。传统的 JPEG 压缩算法采用 JPEG 标准推荐的量化表。考虑到人类接受到的信息 75%以上来自眼睛，若在图像压缩技术中引入人眼视觉特性，量化时，在一定范围内引起的图像变换域频谱系数的量化误差不能为人眼所觉察，因此忽略这部分量化误差并不会对重构图像的质量造成影响，如果可忽略的量化误差越多，那么可获得的压缩比就越大[4—6]。文中主要针对灰度图像，结合人眼亮度对比度敏感特性函数，生成了基于人眼视觉特性的亮度量化表，将其应用于 JPEG 压缩算法的量化环节，文中采用的 JPEG 压缩算法是基于离散余弦变换的有损编码的基本系统。通过对不同种类测试图像的压缩仿真实验，将 JPEG-HVS 压缩算法与标准 JPEG 压缩算法、JPEG 区域法进行对比，验证了文中提出的基于改进量化表的 JPEG 压缩算法的可行性。

1 DCT 离散余弦变换

离散余弦变换（DCT）实质上是以一组不同频率和幅值的余弦函数和来描述一幅图像，其优势在于：在变换过程中能较好地去除信号的相关性；在频域上呈带状，与人眼空间感知特性相符，易于应用在数字图像处理领域；能量集中特性，变换后能量一般集中在低频和部分中频系数上，其值较大，而高频分量包含的信息量比较少，其系数往往为 0 或趋近于 0。由于人眼对高频成分的失真不太敏感，所以可以对高频区域变换系数用更粗的量化，体现在量化表中即量化表左上角的值较小，右上角的值较大。量化后使得零值系数占相当大的比例。根据变换长度的编码思想，正好符合哈夫曼（Huffman）编码原理，同时也有效地增加了压缩比。在数字化图像显示时，一般用其二维系数矩阵来描述，反离散余弦变换则是把系数矩阵变换成对应的图像进行处理。记一幅数字图像用 $f(x,y)$表示，则正逆离散余弦变换分别如式(1)和(2)所示[8]。

$$F(u,v)=a(u)(v)\sum_{u=0}^{M-1}\sum_{v=0}^{N-1}f(x,y)\cos\frac{(2x+1)ux}{2M}\cdot\cos\frac{(2y+1)vx}{2N} \tag{1}$$

$$f(x,y)=\sum_{u=0}^{M-1}\sum_{v=0}^{N-1}a(u)(v)F(u,v)\cos\frac{(2x+1)ux}{2M}\cdot\cos\frac{(2y+1)vx}{2N} \tag{2}$$

式中：$0\le x\le M-1, 0\le y\le N-1, 0\le u\le M-1, 0\le v\le N-1$；$x$，$y$ 为空间域采样值；u，v 是频率域采样值。

2 人眼亮度对比度敏感函数

人眼视觉特性包括非线性、对比度敏感、多通道结构、掩盖效应等特性。对比度敏感函数（CSF）是描述人眼视觉系统空间特性的主要指标之一，CSF 是用对比度敏感程度（即对比度觉察阈值的倒数）与空间频率之间的 CSF（f）关系来表示，表征了人眼视觉系统对图像中不同空间频率成分的响应以及分辨能力。国内外许多信息专家、学者对其进行了大量的研究，到目前为止，根据不同的测量数据和理论分析方法获得了较多的 CSF 数学模型[9—10]。CSF 数学模型可分为人眼亮度 CSF 数学模型及人眼彩色 CSF 数学模型[11—13]。由于是针对灰度图像展开研究，因此只需考虑人眼亮度对比度敏感函数，同时考虑到计算的复杂程度，在对比了现有的几种 CSF 数学模型之后，选用了 Movshon 和 Kiorpes 共同提出的三参数指数模型，其描述的人眼亮度对比度敏感函数为：

$$CSF_{\text{lum}}(f)=75\cdot f^{0.2}\cdot \mathrm{e}^{-0.8f} \tag{3}$$

在视觉研究领域中，空间频率是指每度视角内

刺激的亮暗光栅周期数。结合图像变换域特征，空间频率 f 的计算具体推导如下[14]：

$$\theta = \frac{W}{D} \cdot \frac{180}{\pi}$$

$$W = \frac{w}{K} \times 2.54(\text{cm}) \tag{4}$$

$$f_x = \frac{8}{n_x \theta}$$

$$f_y = \frac{8}{n_y \theta} \tag{5}$$

$$f = \sqrt{(f_x)^2 + (f_y)^2}$$

式中: θ 表示视角；W 为光栅图像的宽度，可以直接通过像素值换算得到；D 为观测距离，取 50 cm；w 为图像整个宽度的像素数；K 为图像的分辨率；n_x, n_y 为 DCT 变换区域内的像素点坐标，$1 \leqslant n_x, n_y \leqslant 8$。

3　JPEG–HVS 图像压缩算法

提出的 JPEG-HVS 图像压缩算法实质是通过人眼亮度 CSF 函数生成一个新的量化表，并将其用于 JPEG 压缩的量化环节。以灰度图像的 JPEG-HSV 压缩为例，其基本思路是：读入一幅灰度图像,将其按 8×8 分块进行 DCT 离散余弦变换；利用式(3)生成的基于人眼亮度对比度敏感视觉特性的 8×8 量化表见表 1。将变换系数矩阵的元素除以量化表里对应位置上的元素，并取整；其余剩下的压缩步骤同 JPEG 压缩算法，图像的重构是图像压缩的逆过程。

表 1　基于 CSF 函数的量化

Tab.1 The quantization chart based on CSF

32	36	38	38	38	38	38	38
36	43	44	45	45	45	45	45
38	44	46	46	46	46	46	46
38	45	46	46	47	47	46	46
38	45	46	47	46	46	46	46
38	45	46	47	46	46	46	46
38	45	46	46	46	46	46	45
38	45	46	46	46	46	45	45

JPEG-HVS 压缩算法流程见图 1。

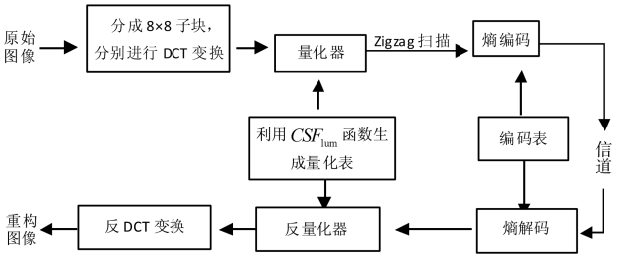


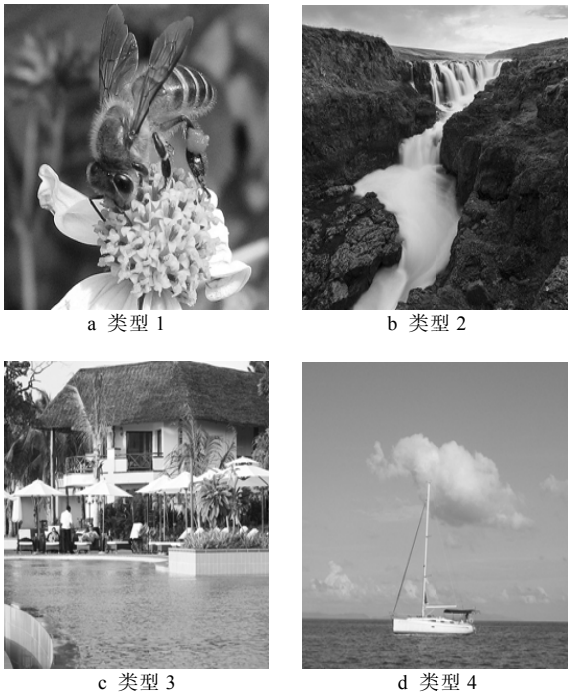
图 1　JPEG-HVS 灰度图像压缩算法流程

Fig.1 Flow chart of JPEG gray image compression algorithm

4　Matlab 仿真实验及结果分析

4.1　Matlab 仿真实验

为了验证 JPEG-HVS 压缩算法的有效性，仿真实验针对不同种类图像，分别为纹理图像、高对比度的图像、背景信息丰富的图像、前后景分明且背景单一的图像，共 4 类 8 幅 256×256 的 8 位灰度测试图像，其中每一种类图像均有 1 张取自美国南加州大学信号图像处理研究所图像库，见图 2。为了对比压缩效果,在 Matlab7.0 中分别仿真了标准 JPEG、JPEG 区域法（只保留左上角的 15 个 DCT 系数）、JPEG-HVS 等 3 种压缩算法。实验结果见表 2。



a 类型 1　　b 类型 2

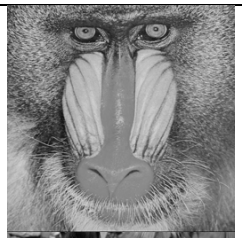
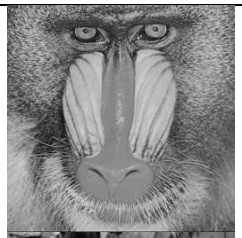
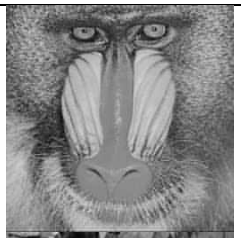
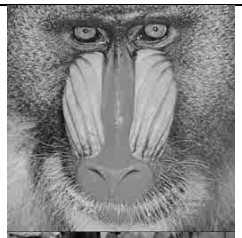
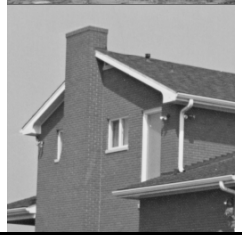
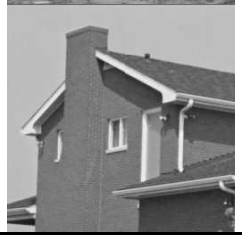
c 类型 3　　d 类型 4

图 2　实验用到的另外 4 类测试原图

Fig.2 Test images for the other four classes of original images

表 2 3 种压缩算法的仿真实验结果对比

Tab.2 The comparison of simulation experiment results about 3 methods

类型	标准原图	标准 JPEG 重构图像	JPEG 区域法重构图像	JPEG-HVS 重构图像
1				
2				
3				
4				

4.2 结果分析

对上述实验结果进行直接观察，人眼几乎很难分辨出原图像与 3 种重构图像之间的差异。为了更好地评价 JPEG-HVS 压缩算法的性能，采用了如下 3 种图像压缩质量评价指标[15—16]。

4.2.1 峰值信噪比（PSNR）

峰值信噪比（PSNR）是目前应用最普遍、最广泛的图像质量客观评价指标。其计算公式如下所示：

$$\mathrm{PSNR}(I,\bar{I})=10\lg(255^2/\mathrm{MSE}(I,\bar{I})) \tag{6}$$

$$\mathrm{MSE}(I,\bar{I})=\frac{1}{MN}\sum_{i=1}^{M}\sum_{j}^{N}\left(I-\bar{I}\right)^2 \tag{7}$$

式中：$I,\bar{I}$ 分别为原图像与重构图像；MSE 为 2 幅图像的均方误差，衡量 2 幅图像的偏离程度，其值越小，2 幅图像之间的差异程度就越小。当 MSE 接近于 0 时，PSNR 趋近于无穷大，因此，PSNR 值越大，表明重构图像与原图像之间的差异越少，即压缩所得的重构图像质量越好。

4.2.2 平均结构相似度（MSSIM）

结构相似度是一种比较新的图像质量客观评价指标，也是一种全参考的图像质量评价指标。用于衡量重构图像与原图像之间的相似程度，其值越接近于 1，说明这 2 幅图像之间相似程度越高。它分别从亮度、对比度、结构 3 方面进行度量，计算公式为：

$$\mathrm{SSIM}(I,\bar{I})=l(I,\bar{I})c(I,\bar{I})s(I,\bar{I}) \tag{8}$$

$$\begin{aligned} l(I,\bar{I})&=\frac{2\mu_I\mu_{\bar{I}}+C_1}{\mu_I^{\,2}+\mu_{\bar{I}}^{\,2}+C_1}\\ c(I,\bar{I})&=\frac{2\sigma_I\sigma_{\bar{I}}+C_2}{\sigma_I^{\,2}+\sigma_{\bar{I}}^{\,2}+C_2}\\ s(I,\bar{I})&=\frac{\sigma_{I\bar{I}}+C_3}{\sigma_I\sigma_{\bar{I}}+C_3} \end{aligned} \tag{9}$$

式(8)的第 1 项 $l(I,\bar{I})$ 为亮度对比函数，衡量的

是 2 幅图像平均亮度之间的相似程度；第 2 项 $c(I,\overline{I})$ 为对比度对比函数，衡量的是 2 幅图像对比度之间的相似性；第 3 项 $s(I,\overline{I})$ 为结构对比函数，衡量的是 2 幅图像结构之间的相似程度。式(9)中 $\mu_I,\mu_{\overline{I}}$ 分别为图像 $I,\overline{I}$ 的灰度均值；$\sigma_I,\sigma_{\overline{I}}$ 分别为图像 $I,\overline{I}$ 的灰度方差；$\sigma_{I\overline{I}}$ 为 2 幅图像之间的协方差。C_1, C_2, C_3 均为常数，是为了避免出现分母为 0 的情况。

为了提高评价结果的精确性，将图像分成 8×8 的子块，采用高斯加权计算每一子块的均值、方差以及协方差，然后计算对应块的结构相似度 SSIM，最后将平均值作为 2 幅图像的结构相似性度量，即平均结构相似性 MSSIM。

4.2.3　压缩比

压缩比为压缩前后比特数的比值，用来衡量压缩算法的压缩能力，在保证图像质量的前提下，压缩比越大，说明去冗余的能力越强，也就意味着传输和存储图像所需的比特数越小。

5　实验结果分析

3 种不同压缩算法的压缩比、PSNR 和 MSSIM 对比见表 3，JPEG 和 JPEG-HVS 等 2 种压缩算法的编、解码时间对比见表 4。

表 3　评价 3 种压缩方法所获得的重构图像质量的参数对比

Tab.3 The parameters comparison of compression quality assessment of the images for three algorithms

类型	压缩比			PSNR			MSSIM		
	JPEG	JPEG 区域法	JPEG_HVS	JPEG	JPEG 区域法	JPEG_HVS	JPEG	JPEG_HVS	JPEG 区域法
1	6.164	9.138	9.004	28.617	25.326	27.156	0.917	0.819	0.897
(1)	8.390	10.858	12.695	31.585	28.011	30.824	0.958	0.928	0.933
2	6.812	9.005	10.301	30.825	27.549	29.995	0.947	0.907	0.915
(2)	8.234	10.705	13.175	30.974	28.399	29.264	0.920	0.883	0.888
3	7.936	10.368	12.170	32.328	28.399	30.213	0.955	0.915	0.923
(3)	6.325	8.894	9.277	29.935	25.649	28.325	0.935	0.876	0.900
4	12.862	15.434	20.417	35.848	33.054	33.606	0.956	0.945	0.944
(4)	21.002	23.879	33.829	38.592	36.228	35.908	0.977	0.968	0.957

表 4　JPEG 和 JPEG–HVS 算法的编、解码时间对比

Tab.4 The time comparison of coding and decoding about JPEG and JPEG-HVS algorithms　　s

类型	JPEG_HVS	JPEG	JPEG_HVS	JPEG
1	2.919	3.134	19.403	27.533
(1)	1.416	1.957	9.271	19.096
2	1.398	2.788	14.544	22.945
(2)	1.170	2.035	11.872	19.381
3	1.113	2.767	11.178	18.511
(3)	1.557	2.409	12.748	23.501
4	0.644	1.613	5.019	9.207
(4)	0.394	0.833	3.717	6.147

从表 3 可以看出，使用 JPEG-HVS 压缩算法能够实现更大的压缩比。JPEG-HVS 压缩算法实现的压缩比比 JPEG 平均高出 53.56%，其中最高高出 61.08%，对应的是第 4 类图像，最低高出 46.07%，对应的是第 1 类图像。与 JPEG 区域法压缩比作比较，除第 1 组的 JPEG-HVS 压缩比略低于 JPEG 区域法外，其他均高于后者，且平均高出 18.75%，其中最高高出 41.67%，对应的是第 4 类图像，最低高出 4.31%，对应的是第 3 类图像。JPEG 对应的 PSNR 最大，其次是 JPEG-HVS，且两者相差不大，平均相对误差不超过 3.5%。除第 2 和 4 组数据外，JPEG-HVS 对应的 MSSIM 均达到 0.9 以上，且除最后一组数据略比 JPEG 区域法的小外，其余数据均大于后者，与 JPEG 的相对误差不超过 3.7%。上述分析表明，经 JPEG-HVS 压缩之后，重构图像在一定误差范围内仍可以得到较好的人眼视觉效果，人眼几乎无法分辨两者之间的差别。

表 4 反映了 JPEG 与 JPEG-HVS 压缩算法的编、解码时间，可以看出后者所需要的编、解码时间要明显低于前者，这也说明了提出的算法的运行速度要大于标准 JPEG 算法的运行速度。

6　结语

提出的基于改进量化表的 JPEG 图像压缩算法，建立在成熟的 JPEG 压缩算法的框架之上，因此实

现起来具有良好的可行性，且算法简单。通过人眼直接观察及对 PSNR 和 MSSIM 这 2 个图像质量评价指标的计算分析，也说明了 JPEG-HVS 的压缩效果具备有效性，满足人眼对图像压缩质量的要求。此外，在满足人眼对图像质量要求的前提下，JPEG-HVS 压缩算法相较于传统 JPEG 压缩算法，可以实现更大的压缩比，更快的编解码速度，更有利于图像的存储与传输。即便在压缩比与 JPEG 区域法的压缩比相当的前提下，提出的压缩算法也可以获得更高质量的重构图像。

考虑到在传统的 JPEG 压缩算法中，彩色图像的压缩和灰度图像的压缩是共用一个亮度量化表的，因此今后还可以从以下几个方面展开研究：研究算法在彩色图像压缩领域的适用性；结合人眼彩色对比度敏感函数，提出基于改进色度量化表的 JPEG 压缩算法。

参考文献：

[1] 孟宪伟, 晏磊. 图像压缩编码方法综述[J]. 影像技术, 2007(1):6—8.
MENG Xian-wei, YAN Lei. A Review of Image Compression Coding Technology[J]. Image Technology, 2007(1):6—8.

[2] 程丽, 王聪丽, 侯著荣, 等. 基于 Matlab 环境的 JPEG 图像压缩[J]. 四川兵工学报, 2011, 32(5):100—102.
CHENG Li, WANG Cong-li, HOU Zhu-rong, et al. JPEG Image Compression based on Matlab[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2011, 32(5):100—102.

[3] 齐宗飞, 卢燕飞. JPEG 图像中量化表对图像质量影响的分析[J]. 铁路计算机应用, 2010, 19(11):8—10.
QI Zong-fei, LU Yan-fei. Analysis on the Influence of Quantization Table on Image Quality in JPEG Image[J]. Railway Computer Application, 2010, 19(11):8—10.

[4] 许艳. 基于人眼视觉特性的图像压缩编码算法[J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2015, 38(2):78—83.
XU Yan. An Image Compression Encoding Algorithm Based on Human Visual Characteristics[J]. Journal of Natural Science of Hunan Normal University, 2015, 38(2):78—83.

[5] ZHEN Yu-wei, KING N N. Spatial Just Noticeable Distortion Profile for Image in Dct Domain[C]// Proceedings of IEEE International Conference on Multimedia and Expo, 2008:925—928.

[6] JIANG Yue-bing, MARIOS S P. Jpeg Image Compression Using Quantization Table Optimization Based on Perceptual Image Quality Assessment[C]// The Proceedings of 45th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, 2011:225—229.

[7] 张元伟, 刘彦隆. 基于 JPEG 标准的静态图像压缩算法研究[J]. 电子设计工程, 2010, 18(2):78—80.
ZHANG Yuan-wei, LIU Yan-long. Research of Static Image Compression Algorithm Based on JPEG Standard[J]. Electronic Design Engineering, 2010, 18(2):78—80.

[8] 张德丰. MATLAB 数字图像处理[M]. 北京:机械工业出版社, 2012.
ZHANG De-feng. Digital Image Processing Based on MATLAB[M]. Beijing: China Machine Press, 2012.

[9] YIN Chen, RICK S B. A New Automated Quality Assessment Algorithm for Image Fusion[J]. Image and Vision Computing, 2009, 27(10):1421—1432.

[10] 姚军财. 基于人眼对比度感知特性的数字图像防伪技术研究[J]. 光学电子技术, 2011, 31(4):226—232.
YAO Jun-cai. Anti-counterfeiting Technology of Digital Image Based on Human Visual System[J]. Optoelectronic Technology, 2011, 31(4):800—807.

[11] 申静. 一种基于人眼感知特性的彩色图像压缩算法[J]. 包装工程, 2014, 35(19):93—97.
SHEN Jing. A Color Image Compression Algorithm Based on Human Perception Characteristics[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(19):93—97.

[12] 姚军财. 用显示器测量人眼对比度敏感函数[D]. 昆明:云南师范大学, 2011.
YAO Jun-cai. The Calculation of Human Visual Contrast Sensitivity Function Based on CRT[D]. Kunming: Yunnan Normal University, 2011.

[13] BENOIT A, CAPLIER A, DVRETTE B, et al. Using Human Visual System Modeling for Bio-inspired Low Level Image Processing[J]. Computer Vision and Image Understanding, 2010, 114(7):758—773.

[14] 姚军财. 基于人眼对比度敏感视觉特性的彩色图像压缩技术[J]. 液晶与显示, 2012, 27(6):800—807.
YAO Jun-cai. Color Image Compression Technology Based on Contrast Sensitivity Characteristics of Human Vision System[J]. Chinese Journal Liquid Crystals and Displays, 2012, 27(6):800—807.

[15] ALAIN H, DJEMEL Z. Image Quality Metrics:PSNR vs. SSIM[C]// International Conference on Pattern Recognition, 2010:2366—2369.

[16] DENG Chen-wei, MA Lin, LIN Wei-si, et al. Visual Signal Quality Assessment:Quality of Experience(QoE)[M]. Switzerland:Springer, 2015.