

# 一种基于人眼视觉特性的解压缩图像质量提高方法

姚军财, 申静

(陕西理工学院, 汉中 723000)

**摘要:** **目的** 为了提高解压缩重建图像的视觉效果和质量。 **方法** 结合人眼视觉特性和图像变换域频谱系数特征, 构建了一个提升解压缩图像质量的补偿矩阵, 用以在解压缩过程中对反量化系数起到补偿作用, 并采用JPEG压缩算法, 对3幅彩色图像进行仿真实验验证。 **结果** 在6种压缩比下, 相对于JPEG技术, 在解压缩重建图像过程中加入补偿矩阵后, 反映提升图像质量的参数SSIM和PSNR值分别平均增加了2.5275%和11.8977%。 **结论** 该补偿矩阵有效提升了解压缩图像的质量, 较好地弥补了压缩过程中因量化而导致图像质量下降的不足。

**关键词:** 图像压缩; 人眼视觉特性; 补偿矩阵; 结构相似度

**中图分类号:** TS865 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2015)21-0095-07

## A Novel Method to Improve Quality of Decompressed Image Based on Characteristics of Human Visual System

YAO Jun-cai, SHEN Jing

(Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723000, China)

**ABSTRACT:** This study aimed to improve the visual effect and the quality of the reconstructed images. Combining the characteristics of human visual system and spectrum coefficients in the transformation domain, a compensation matrix was constructed to improve the quality of decompressed image, which was to compensate the inverse quantization coefficients during the decompression. And the simulation experiments were carried out for three color images based on JPEG compression algorithm. The experimental results showed that, under the six compression ratios, compared with JPEG technology, SSIM and PSNR average values that reflected improved image quality were increased respectively by 2.5275% and 11.8977% by adding the compensation matrix in the reconstruction process of the decompressed image. The experiment showed the compensation matrix can enhance effectively the quality of the decompressed image, and compensates the quality degradation due to quantization during compression.

**KEY WORDS:** image compression; characteristics of human visual system; compensation matrix; structural similarity

随着信息和多媒体技术的高速发展, 信息越来越贴近人们的生活。然而, 在信息技术带给人们方便的同时, 海量的信息也给人们带来了诸如如何有效存储、高效传输和合理处理信息等一系列难题。同时, 这些问题的出现也促使信息压缩技术成为近些年来研究的焦点, 吸引了大量科研工作者广泛的探讨和深入研究<sup>[1-3]</sup>。

图像是信息表现的主流之一, 国内外对其进行了大量研究, 尤其是在图像压缩技术方面<sup>[4-9]</sup>, 目前已形成了JPEG和JPEG2000图像压缩国际标准。然而, 2个国际标准目前普遍认为存在一定的缺陷<sup>[7-10]</sup>, 主要表现为没有较全面的、有效的结合人眼视觉特性。JPEG几乎没考虑视觉特性, 而JPEG2000只结合了人眼频率敏感特性。根据目前对人眼视觉特性的研究进展, 至少在

收稿日期: 2015-03-22

基金项目: 国家自然科学基金(61301237); 陕西省科技新星计划(2015KJXX-42); 陕西省教育厅专项科研基金(2015JK1139)

作者简介: 姚军财(1979—), 男, 湖北黄冈人, 硕士, 陕西理工学院副教授, 主要研究方向为颜色科学、多媒体信号处理与通信。

人眼亮度敏感特性、对比度敏感特性、频率敏感特性和掩蔽特性方面取得了一定成果<sup>[11-14]</sup>,则可将其成熟的特性应用于图像压缩中。另外,当压缩比超过一定值后,解压缩图像质量明显下降。分析其原因主要是因为图像变换域系数量化过程中,由于没有考虑人眼的视觉效果,只是为了增加压缩比,而使得较多的频谱系数量化为0,而在解压缩过程中,反变换虽然是采用了无损编码,但量化损失的信息没有得到有效的补偿,从而使得解压缩出来的图像存在一定程度上的失真,导致了其质量的下降<sup>[4-7,10]</sup>。基于此,结合人眼对比度敏感等视觉特性和图像变换域频谱系数特征,构建了一种在解压缩时的反量化补偿矩阵,通过补偿矩阵在反量化过程中的补偿作用,使得解压缩后图像的质量有较明显提高,并采用JPEG压缩算法,对3幅图像进行了6种压缩比的仿真实验验证。

## 1 人眼对比度感知特性数学模型

人眼对比度敏感视觉特性一般采用人眼对比度敏

感函数(CSF)来定量描述,其主要通过在不同条件下的人眼亮度和色度对比度敏感阈值,与空间频率之间的关系来描述,则函数本身反映了人眼的对比度、亮度、色度、频率敏感和掩蔽等特性。按照心理物理学和韦伯定律,人眼对比度敏感阈值定量的描述为人眼处于分辨力临界状态时,目标对比度值的倒数,即人眼对比度觉察阈值的倒数<sup>[10-12]</sup>。从1930年开始,国内外对CSF进行了大量研究,目前得出了较多的数学模型<sup>[10-12,15]</sup>。结合CSF模型反映视觉特性的效果、颜色空间特性、图像处理的实际需要和复杂度,这里采用由Mullen等提出的对立色空间的色度模型和由Movshon等提出的指数亮度模型。其表达式为<sup>[10-12]</sup>:

$$C_{T-lum}(f_{\theta}) = 75f_{\theta}^{0.2} e^{-0.8f_{\theta}} \quad (1)$$

$$C_{T-rg}(f_{\theta}^i) = a_1 e^{b_1 f_{\theta}^i} + a_2 e^{b_2 f_{\theta}^i} \quad (2)$$

式中: $C_{T-lum}$ 和 $C_{T-rg}$ 分别为人眼亮度和色度对比度敏感阈值; $f_{\theta}$ 为视觉上的空间频率,即角频率(周/°)<sup>[9]</sup>;参数 $a, b$ 和 $c$ 的值见表1。

表1 模型中各参数的值

Tab.1 The values of the parameters in the model

参数	$a_1$	$b_1$	$c_1$	$a_2$	$b_2$	$c_2$
Blue-Yellow	7.032 845	-0.0004	4.258 205	40.690 950	-0.103 909	1.648 658
Red-Green	109.1413	-0.0037	3.424 36	93.597 11	-0.003 67	2.167 71

## 2 基于人眼视觉特性的反量化补偿矩阵计算

要减小因变换域系数量化而带来的解压缩图像质量下降,必须采取一定的补偿措施,使得反量化后矩阵中置0的频谱系数尽量恢复到原始信息所对应的系数。针对此问题,提出以补偿矩阵补偿反量化时信息的损失。

在压缩技术中,量化置0的频谱系数被认为是冗余的信息,一般其频谱系数比较小或接近于0,人眼对其信息不敏感,也即是此类信息的频谱系数值在人眼觉察误差阈值以下。人眼觉察误差阈值是指人眼处于刚刚能分辨,而又不能全分辨的临界状态时目标的可见度值,则采用人眼对图像的觉察误差阈值代替反量化时的零系数,可起到较好的补偿作用。依据一般DCT变换中的子块划分方法,补偿系数需要形成8元素×8元素的矩阵,并称之为反量化补偿矩阵,其计算的基本思路为:对彩色图像进行亮度和色度分离、时频变换和8像素×8像素子块划分,计算任一子块中所

有元素所对应位置的角频率,并将其代入到人眼视觉特性亮度和色度模型CSF中,计算其对比度觉察阈值,利用直流分量计算出人眼观察图像时的可见度阈值,即作为反量化补偿矩阵中的元素。具体的计算方法如下所述。

### 2.1 基于视觉特性的图像角频率计算

要计算图像的角频率,必须知道人眼观察图像时的视角 $\theta$ 和所在视角内图像对应光栅的周期数目 $N$ 。在视觉特性的测量过程中,目标光栅一般用显示器或其他光学仪器显示,目标光栅的大小设置为边长为 $H$ 的矩形,光栅中条纹的宽度通过控制其像素的多少来进行调节,从而控制光栅内条纹的周期数目;人眼觉察距离记为 $D$ ,见图1。

则观察视角的计算公式为:

$$\theta = 2\arctan\left(\frac{H}{2D} \cdot \frac{180}{\pi}\right) = \arctan\left(\frac{n \cdot 2.54}{KD} \cdot \frac{180}{\pi}\right) \quad (3)$$

式中: $K$ 为显示器的分辨率,一般取72 dpi; $n$ 为以

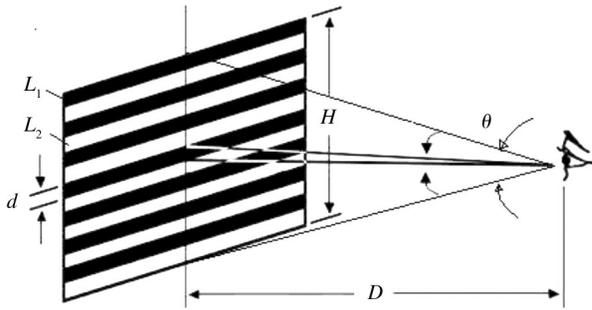


图1 矩形亮度光栅和观察视角计算方法示意

Fig.1 The rectangular luminance grating and the diagram of observation angle calculation method

像素衡量的观测目标大小,由于采用的是8像素×8像素子块,则n为8。若观察距离和光栅大小不变,则视角保持为定值。在基于DCT变换的压缩技术中,需要对图像子块进行时频变换。通过图像变换实验发现,当对图像进行离散余弦正逆变换时,变换域频谱中的任意2个点,经反变换后,在原图大小的空域中形成了明暗光栅,光栅条纹的周期数目为频谱图中2点的坐标之差;若规定其中一个点的坐标为原点,则另一个点即可为任意一点(u,v),则表明反变换后空间域上形成水平和垂直方向上分别有u和v个条纹的光栅。而对于人眼的视觉功能来说,人眼类似于频谱滤波器,当人眼觉察图像时,相当于将图像作时频变换。则当人眼觉察频谱图像中的某一位置(u,v)时,相当于观察其对应空域中具有条纹数目为 $N = \sqrt{u^2 + v^2}$ 的光栅。其实验演示见图2。

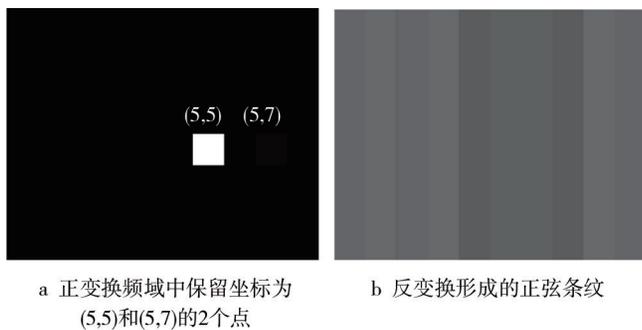


图2 图像子块DCT正逆变换效果演示示意

Fig.2 Schematic images to reflect the relationship between the DCT forward transformation and the inverse transformation

依据角频率的定义,则当人眼觉察图像时,图像的角频率计算公式为:

$$f_{\theta} = \frac{1}{2} \cdot \frac{N}{\theta} = \frac{1}{2} \frac{\pi}{180 \arctan\left(\frac{n \cdot 2.54}{KD}\right)} \sqrt{u^2 + v^2} \quad (4)$$

式中:1/2表示目标的明、暗刺激效果各占一半。

## 2.2 红绿和蓝黄对立色对比度定义

目前,亮度对比度一般采用 Michelson 给出的对比度定义,见式(5)。而色度对比度定义由于色彩的复杂性和多样性,到目前为止仍还没有统一的数学描述<sup>[11-12,15]</sup>。根据前人视觉特性的测量方法和常见压缩技术中用到的色彩空间特征,提出一种红绿和蓝黄对立色色度对比度定义的数学表达形式,见式(6)和(7)。其具体的定义方法为用色度值 $a^*$ 和 $b^*$ 分别代替亮度对比度定义中的 $L_1$ 和 $L_2$ 值。

亮度:

$$C_L = \frac{\Delta L}{L}, \bar{L} = \frac{L_1 + L_2}{2}, \Delta L = |L_1 - L_2| \quad (5)$$

红绿:

$$C_{rg} = \frac{\Delta a^*}{a^*}, \bar{a^*} = \frac{a_1^* + a_2^*}{2}, \Delta a^* = |a_1^* - a_2^*| \quad (6)$$

蓝黄:

$$C_{yb} = \frac{\Delta b^*}{b^*}, \bar{b^*} = \frac{b_1^* + b_2^*}{2}, \Delta b^* = |b_1^* - b_2^*| \quad (7)$$

式中: $L_1$ 和 $L_2$ 分别为2个对比目标(光栅条纹)的亮度,取值范围为0~100; $a_1^*, a_2^*, b_1^*, b_2^*$ 分别为红、绿、蓝、黄的色度值,取值范围为-120~120。

## 2.3 补偿矩阵计算方法

结合图像的角频率计算结果、对比度定义和图像时频变换频谱系数特征,反量化补偿矩阵中元素(即人眼觉察图像时的最小可见度阈值)的计算方法如下所述。

1) 对彩色图像进行色度和亮度分离,得到亮度和红绿、蓝黄分量亮度图,再对其进行8像素×8像素大小的子块划分,并对每个子块进行DCT变换,变换后提取其直流分量(DC)和交流分量(AC)值;对于每个单独的子块,其对应位置上的坐标(u,v)描述均相同;坐标相同,则其反变换空域图中对应的光栅周期数目N即相同,即可用8元素×8元素的矩阵 $J_N$ ,描述任何一个子块的64个位置点所对应的空域中光栅的周期数目。

2) 将 $J_N$ 代入式(4)中,计算出子块频谱图上每个位置的角频率,并将计算结果代入到人眼视觉特性的亮度和色度数学模型中,分别计算出亮度、红绿和蓝黄色的对比度敏感阈值。再取对比度敏感阈值的倒

数,即为人眼对比度觉察阈值。

3) 取亮度和色度分量块变换域的直流分量值 ( $V_{DC}$ ),分别作为对比度定义中的平均亮度和色度值,将计算获得的人眼对比度觉察阈值代入到亮度和色度对比度定义中,分别得到人眼处于临界分辨状态时的  $\Delta L, \Delta a^*$  和  $\Delta b^*$ ,分别表示人眼觉察图像时的亮度、红绿和蓝黄色的最小觉察误差阈值,即可见度阈值。其值的大小表明了人眼分辨目标的误差范围。当频谱系数的改变不超过该误差范围时,人眼对其改变没有任何敏感觉察反应,则其值可作为压

缩中反量化后损失信息的补偿,补偿效果直接描述为将可见度阈值替代反量化后子块变换域频谱系数中的零值系数。

4) 对于8像素×8像素大小的子块,其变换域上每个位置均对应1个补偿系数,则构建8元素×8元素的矩阵  $J_{comp}$ ,让补偿系数按照子块的坐标作为矩阵的元素值,则构建的矩阵  $J_{comp}$  称之为反量化补偿矩阵,并通过多次正逆DCT变换尝试,使之更符合人眼观察效果。亮度和红绿、蓝黄色度的  $J_{comp}$  矩阵计算结果分别见式(8)(9)(10)。

$$J_{comp-lum} = V_{DC} \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.0001 & 0.0003 & 0.0008 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.0001 & 0.0003 & 0.0009 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.0001 & 0.0001 & 0.0004 & 0.0011 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.0001 & 0.0002 & 0.0006 & 0.0016 \\ 0 & 0 & 0.0001 & 0.0001 & 0.0002 & 0.0004 & 0.0010 & 0.0025 \\ 0.0001 & 0.0001 & 0.0001 & 0.0002 & 0.0004 & 0.0009 & 0.0019 & 0.0046 \\ 0.0003 & 0.0003 & 0.0004 & 0.0006 & 0.0010 & 0.0019 & 0.0040 & 0.0089 \\ 0.0008 & 0.0009 & 0.0011 & 0.0016 & 0.0025 & 0.0046 & 0.0089 & 0.0188 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$J_{comp-rg} = V_{DC} \cdot \begin{bmatrix} 0.0049 & 0.0050 & 0.0053 & 0.0065 & 0.0091 & 0.0126 & 0.0153 & 0.0178 \\ 0.0050 & 0.0051 & 0.0055 & 0.0069 & 0.0095 & 0.0129 & 0.0155 & 0.0180 \\ 0.0053 & 0.0055 & 0.0062 & 0.0079 & 0.0108 & 0.0137 & 0.0160 & 0.0186 \\ 0.0065 & 0.0069 & 0.0079 & 0.0100 & 0.0126 & 0.0149 & 0.0170 & 0.0197 \\ 0.0091 & 0.0095 & 0.0108 & 0.0126 & 0.0144 & 0.0162 & 0.0184 & 0.0214 \\ 0.0126 & 0.0129 & 0.0137 & 0.0149 & 0.0162 & 0.0180 & 0.0204 & 0.0237 \\ 0.0153 & 0.0155 & 0.0160 & 0.0170 & 0.0184 & 0.0204 & 0.0232 & 0.0270 \\ 0.0178 & 0.0180 & 0.0186 & 0.0197 & 0.0214 & 0.0237 & 0.0270 & 0.0315 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$J_{comp-yb} = V_{DC} \cdot \begin{bmatrix} 0.0210 & 0.0217 & 0.0233 & 0.0257 & 0.0290 & 0.0333 & 0.0390 & 0.0466 \\ 0.0217 & 0.0222 & 0.0238 & 0.0261 & 0.0294 & 0.0338 & 0.0396 & 0.0472 \\ 0.0233 & 0.0238 & 0.0252 & 0.0275 & 0.0309 & 0.0353 & 0.0412 & 0.0491 \\ 0.0257 & 0.0261 & 0.0275 & 0.0299 & 0.0333 & 0.0379 & 0.0441 & 0.0525 \\ 0.0290 & 0.0294 & 0.0309 & 0.0333 & 0.0369 & 0.0418 & 0.0485 & 0.0567 \\ 0.0333 & 0.0338 & 0.0353 & 0.0379 & 0.0418 & 0.0472 & 0.0546 & 0.0648 \\ 0.0390 & 0.0396 & 0.0412 & 0.0441 & 0.0485 & 0.0546 & 0.0631 & 0.0750 \\ 0.0466 & 0.0472 & 0.0491 & 0.052 & 0.0576 & 0.0648 & 0.0750 & 0.0896 \end{bmatrix} \quad (10)$$

### 3 实验与结果

为了验证上述方法的有效性,采用JPEG压缩技术,且在解压过程中,在反量化后增加一个补偿矩阵,

再对其进行逆DCT变换,最后重建彩色图像。对3幅标准的彩色图像Lena、Pepper和Lotus(来自Computer Vision Group, University of Granada)分别进行6种压缩比的仿真实验。同时,为了与JPEG压缩效果作对比,对3幅彩色图像进行JPEG压缩,结果分别见图3—8。



图3 Lena图在不同压缩比下增加反量化补偿矩阵时的解压缩实验结果

Fig.3 Decompressed images added with the compensatory matrix after inverse quantization under different compression ratios for Lena image

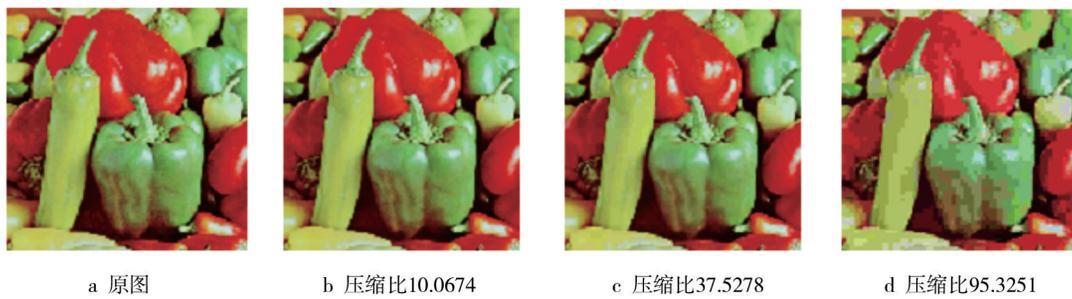


图4 Pepper图在不同压缩比下增加反量化补偿矩阵时的解压缩实验结果

Fig.4 Decompressed images added with the compensatory matrix after inverse quantization under different compression ratios for Pepper image

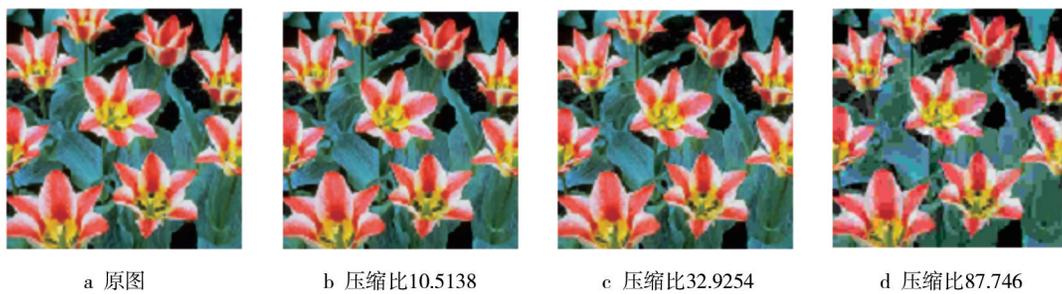


图5 Lotus图在不同压缩比下增加反量化补偿矩阵时的解压缩实验结果

Fig.5 Decompressed images added with the compensatory matrix after inverse quantization under different compression ratios for Lotus image



图6 对Lena图采用JPEG技术压缩的实验结果

Fig.6 The compressed results using the JPEG for Lena image

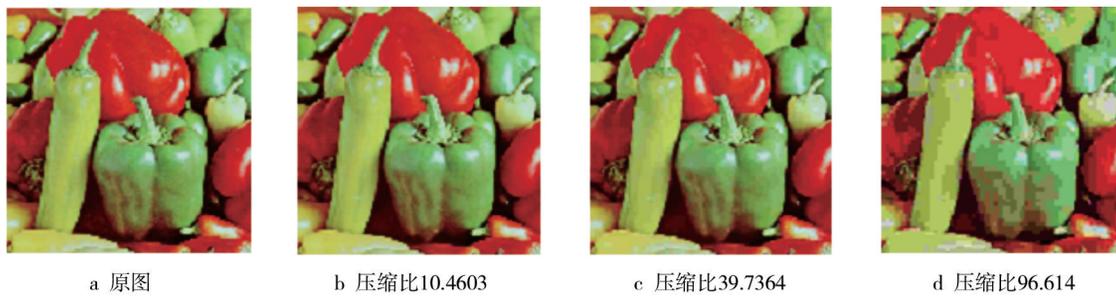


图7 对Pepper图采用JPEG技术压缩的实验结果

Fig.7 The compressed results using the JPEG for Pepper image

压缩比的大小见表2。

对比分析图3—8的实验结果,可以从主观上明

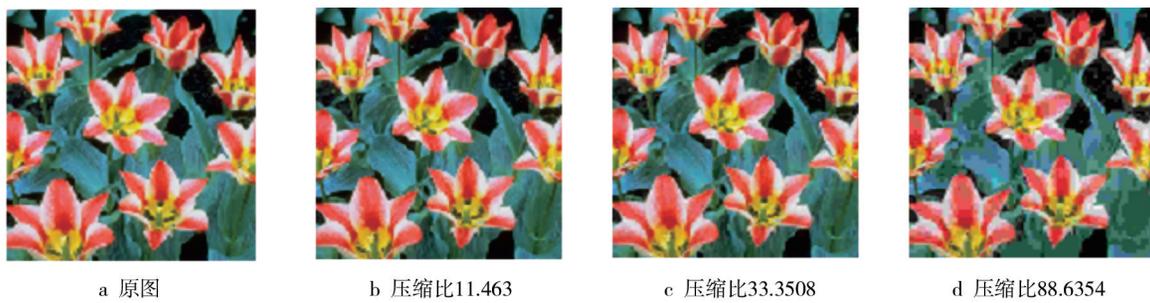


图8 对Lotus图采用JPEG技术压缩的实验结果  
Fig.8 The compressed results using the JPEG for Lotus image

显看到:在JPEG解压缩过程中增加补偿后,解压缩图像部分细节得到了恢复,图像质量得到了一定程度的提高。

#### 4 讨论

在图像技术中,一般采用结构相似度归一化值(SSIM)和峰值信噪比(PSNR)作为评价解压缩图像质量的参数<sup>[5,15]</sup>。其中,SSIM值越接近于1,表明其图像越接近于原图;PSNR值越大,效果越好,其一般超过30 dB时,人眼不能分辨2幅图像之间的差异。为了更好

地说明在JPEG压缩过程中,增加补偿后解压缩图像质量的提高,对3幅彩色图像进行了6种压缩比的仿真实验,计算了解压缩图像的SSIM值和PSNR值,并得出了3幅解压缩图像的率失真曲线;同时,计算了经过2种方法压缩后解压图像的信息熵,结果见表2和图9。

从表2的数据和率失真曲线来看,在JPEG压缩过程中增加补偿后,3幅图像在各种压缩比下,SSIM值平均值提高了2.5275%,PSNR值平均值增加了11.8977%,信息熵稍有增加,表明解压缩图像的质量有一定程度的提高,反量化补偿矩阵起到了一定的补偿作用。

表2 3幅彩色图像的6种压缩比和各压缩比下解压图像的SSIM值及信息熵

Tab.2 Six compression ratios of three color images and the results of calculated SSIM and entropy of decompressed images

方法	增加补偿			JPEG			SSIM值平均提高幅度/%
	压缩比	SSIM值	信息熵	压缩比	SSIM值	信息熵	
Lena	11.133	0.9787	1.5325	11.8395	0.9595	1.5321	3.5241
	18.2298	0.9499	1.5326	19.7712	0.9166	1.5324	
	31.0058	0.9148	1.5332	32.708	0.8819	1.5329	
	41.6675	0.8677	1.5378	42.1171	0.8411	1.5365	
	78.5646	0.7555	1.5396	77.8434	0.7299	1.5387	
	106.8231	0.6849	1.5495	104.8517	0.6516	1.5415	
Pepper	10.0674	0.9805	1.5506	10.4603	0.9611	1.5495	1.9016
	17.5199	0.9505	1.5506	18.6872	0.9121	1.5496	
	32.1623	0.9213	1.5508	32.7843	0.9055	1.5499	
	37.5278	0.8702	1.5524	39.7364	0.8423	1.5516	
	68.0422	0.7489	1.5529	70.9279	0.7371	1.5517	
	95.3251	0.6669	1.5620	96.614	0.6769	1.5532	
Lotus	10.5138	0.986	1.5518	11.463	0.9727	1.5517	2.1566
	15.7745	0.9656	1.5522	16.7579	0.9484	1.5521	
	23.5824	0.9306	1.5526	24.8279	0.9194	1.5525	
	32.9254	0.8864	1.5530	33.3508	0.8705	1.5528	
	57.4732	0.7863	1.5532	59.1801	0.7689	1.5529	
	87.746	0.7040	1.5586	88.6354	0.6740	1.5577	

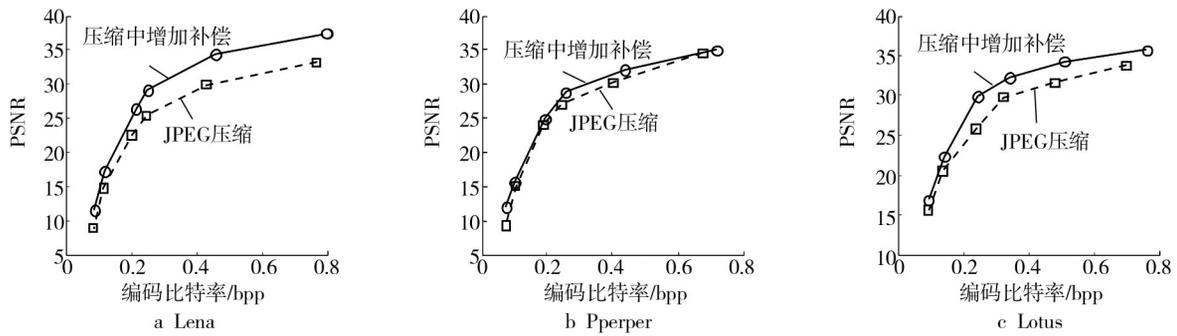


图9 采用JPEG技术和增加补偿方法对3幅彩色图像进行压缩的率失真曲线

Fig.9 The rate distortion curves of three color images compressed with the JPEG and the compression method added with compensatory matrix

## 5 结语

结合人眼视觉特性,提出了一种解压缩图像的质量提升方法。该方法以人眼最小觉察误差阈值作为子块反量化系数的补偿矩阵元素,提出一个提升解压缩图像质量的反量化补偿矩阵,以提升解压缩图像的质量。为了验证其有效性,在JPEG的解压缩过程中,对其反量化数据增加一个补偿矩阵来实现解压缩,并对3幅彩色图像进行了仿真实验。在6种压缩比下,相对于JPEG技术,反映提升图像质量的参数SSIM值和PSNR值平均增加了2.5275%和11.8977%,该补偿矩阵有效提升了解压缩图像的质量,较好地弥补了JPEG压缩技术的不足。

## 参考文献:

- [1] WANG X, JIANG G Y, ZHOU J M, et al. Visibility Threshold of Compressed Stereoscopic Image: Effects of Asymmetrical Coding[J]. *Journal of Imaging Science*, 2013, 61(2): 172—182.
- [2] BENOIT A, CAPLIER A, DURETTE 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.
- [3] 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.
- [4] CINTRA R J, BAYER F M. A DCT Approximation for Image Compression[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2011, 18(10): 579—582.
- [5] WANG Z, BOVIK A C, SHEIKH H R, et al. Simoncelli. Image Quality Assessment: From Error Visibility to Structural Similarity[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, 13(4): 600—612.
- [6] BHATT A, ASHUTOSH K B. Image Compression Algorithms under JPEG with Lapped Orthogonal Transform and Discrete Cosine Transformation[J]. *Image*, 2013, 7(3): 6—10.
- [7] CHOU C H, LIU K C. Color Image Compression Based on the Measure of Just Noticeable Color Difference[J]. *IET Image Processing*, 2008, 2(6): 304—322.
- [8] 申静. 一种利用人眼视觉特性的数字图像水印技术[J]. *液晶与显示*, 2011, 26(2): 234—240.  
SHEN Jing. Digital Image Watermarking Technology Based on Human Vision Characteristics[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2011, 26(2): 234—240.
- [9] OGE Marques. 实用MATLAB图像和视频处理[M]. 章毓晋, 译. 北京: 清华大学出版社, 2013.  
OGE M. *Practical Image and Video Processing Using Matlab* [M]. Translated by ZHANG Y J. Beijing: Tsinghua University Press, 2013.
- [10] ITTI L. Quantitative Modeling of Perceptual Saliency at Human Eye Position[J]. *Visual Cognition*, 2006, 14(4): 959—984.
- [11] NADENAU M. Integration of Human Color Vision Models into High Quality Image Compression[D]. Switzerland: cole Polytechnique F é d é rale de Lausanne, 2000.
- [12] MULLEN K T. The Contrast Sensitivity of Human Color Vision to Red-green and Blue-yellow Chromatic Gratings[J]. *The Journal of Physiology*, 1985, 359: 381—400.
- [13] JAFARI R, ZIOU D, RASHIDI M M. Increasing Image Compression Rate Using Steganography[J]. *Expert Systems with Applications*, 2013, 40(17): 6918—6927.
- [14] YAO Jun-cai. Measurements of Human Vision Contrast Sensitivity to Opposite Colors Using a Cathode Ray Tube Display [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(23): 2425—2432.
- [15] GINESU G, MASSIDDA F, GIUSTO D D. A Multi-factors Approach for Image Quality Assessment Based on a Human Visual System Model[J]. *Signal Processing: Image Communication*, 2006, 21(4): 316—333.