

# 基于 DWT 的彩色图像水印不可感知性评价<sup>\*</sup>)

杨红梅 梁永全 刘连山 段 华

(山东科技大学信息科学与工程学院 青岛 266510)

**摘要** 水印的不可感知性是评价水印算法性能优劣的重要指标之一,传统图像质量评价模型 PSNR 不能很好地评价水印化图像的质量。本文通过分析彩色图像中背景亮度、纹理、频率以及颜色对人类视觉的掩蔽,提出了一个基于 DWT 的彩色图像视觉掩蔽强度计算方法,并据此为彩色图像中各像素设置视觉质量掩蔽权值,得到了一个彩色图像水印不可感知性评价模型。实验结果表明新模型优于传统模型 PSNR,其评价结果更接近人的视觉感觉。

**关键词** 数字水印,不可感知性评价,HVS,DWT

## DWT-based Imperceptibility Evaluation of Watermark in Watermarked Color Image

YANG Hong-mei LIANG Yong-quan LIU Lian-shan DUAN Hua

(College of Information Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266510, China)

**Abstract** The imperceptibility of the watermark is one of the most important aspects for the performance of the watermarking algorithm. Conventional measure of image quality PSNR can't evaluate the quality of the watermarked image well. The different background luminance, texture, frequency and the color of the image mask the human eyes differently. This characteristic can be used to improve the conventional measure PSNR. By calculating the masking threshold of the background luminance, the texture, frequency and the color of pixel, the masking-weight for each pixel was calculated and an imperceptibility measure with these weights was obtained for the watermark in the watermarked color image. The conventional measure and the new one were compared through different experiments. The result judged by the new measure is more close to the result judged by human eyes than the conventional measure.

**Keywords** Digital watermarking, Imperceptibility evaluation, Human vision system, Discrete wavelet transform

### 1 引言

与水印算法研究相比,对水印性能评价的研究却相对滞后,因此阻碍了水印研究的发展<sup>[1]</sup>。经过近二十年的研究,基于各种理论的水印算法层出不穷<sup>[2-5]</sup>,因此对不同水印算法性能优劣进行评价成为必要。Kutter<sup>[1]</sup>指出公平地比较不同的水印算法,必须考虑图像的视觉降质。水印化图像的视觉降质越小(或者说水印化图像的质量越好),则嵌入的水印对载体图像的影响越小,即水印的不可感知性越好。因此水印的不可感知性就成为衡量水印算法性能优劣的重要指标之一。

人们常用的水印化图像质量评价模型有 SNR, PSNR 和 MSE,但这些模型并不适用于水印化图像质量的评价。对图像质量进行评价的难点主要是由于人类视觉的复杂性,且对视觉信息处理机制的研究还不够成熟,因此还没有一个准确的图像质量感知客观度量方法。目前已有一些关于灰度图像中水印不可感知性的评价研究<sup>[6,7]</sup>,但对彩色图像中水印不可感知性的评价研究还很少。文献<sup>[6,7]</sup>中由于都没有利用人眼的视觉掩蔽特性,因此还不能很好地对水印化图像质量进行评价。

本文分析了图像中频率、背景亮度、纹理以及色彩对人类视觉的掩蔽,在第 2 小节给出了一个视觉掩蔽强度计算方法,称为 JNCD(Just Noticeable Color Differences)计算模型;第 3 小节给出一个彩色图像质量评价模型 MPSNR(Mask-based

Peak Signal to Noise Ratio);第 4 小节对上述给出的 MPSNR 进行了实验验证;最后是本文的总结。

### 2 彩色图像像素视觉掩蔽强度计算方法

人类视觉的掩蔽特性是可以对图像进行压缩的前提,也是信息隐藏与数字水印得以实施的基础。因此合理评价水印化图像的质量,应遵循人类视觉的掩蔽特性。

#### 2.1 亮度掩蔽

德国生理学家韦伯发现引起差感觉所需要的最小刺激的最小增量或减量  $\Delta I$  和原来的刺激强度  $I$  的比值是一个常数  $K$ ,可用公式表示为  $K = \Delta I / I$ 。因此图像的背景亮度关系到人眼对嵌入水印的感知性,背景亮度越强,人眼对加在其上的水印的敏感性越低。

DWT 域中低频逼近子图是图像能量的集中,其各系数反映了图像中某局部的图像亮度等级。Lewis<sup>[8]</sup>将图像做四级小波变换,利用第 4 级低频逼近子带中  $2 \times 2$  矩阵各系数的均值表示图像对应位置像素的背景亮度。我们借鉴这一思想,通过计算不同像素的背景亮度来对像素可掩蔽水印强度进行估计。考虑算法的时间复杂性,本文仅取一级小波变换低频逼近子带来对图像背景亮度进行估值,并经适当调整给出如式(1)所示的图像像素背景亮度计算公式。

设原图像为  $I$ ,其一级小波变换各子带系数为  $C_{\lambda,\theta}$ ,  $\lambda(\lambda \in \{1, 2, \dots\})$  和  $\theta(\theta \in \{1, 2, 3, 4\})$  分别代表子带的尺度和方向,  $\theta$

<sup>\*</sup>)国家自然科学基金(70371052),山东省优秀中青年科学家奖励基金(2006BS01021),山东科技大学科学发展基金(05g018)。杨红梅 副教授,博士研究生,主要研究方向为图像处理、数字水印、人工智能。

为1到4分别表示低频、水平、对角和垂直子带,定义背景亮度计算公式为:

$$I(x,y)=16^{-1} \times \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 C_{1,1}(i+ceil(x/2),j+ceil(y/2)) \quad (1)$$

其中  $ceil(x)$  表示取大于  $x$  的最小整数。

## 2.2 纹理掩蔽

纹理掩蔽是指一个图像成份由于另一个的出现而降低的视觉敏感性。人眼对图像中平滑区域的噪声敏感性较高,而对纹理复杂区域的噪声敏感性较低。图像的高频子带系数矩阵反映了图像水平、垂直和对角方向的纹理复杂程度。Safra<sup>[9]</sup>将某一区域的方差与该区域内所有系数的平方之和定义为纹理能量,用以描述图像的纹理掩盖效应。Lewis 借鉴这一思想,给出了利用四级小波变换各子带系数计算图像纹理强度的公式<sup>[8]</sup>。

图像的一级小波高频子带系数反映图像中步长为1的变换频率,二级小波高频子带反映图像中步长为2的变换频率,其后步长依层次成倍递增,即第  $r$  层的步长是第  $r-1$  层步长的两倍。因此随着小波变换层次的增加,高频子带对图像纹理的考察越粗糙,其对图像纹理描述的精细程度也越低,同时考虑到算法的时间复杂性,本文中仅取对纹理刻画最精细的一级小波高频子带系数来对图像纹理强度进行估值,定义图像纹理强度计算公式如下:

$$t(\theta,x,y)=8^{-1} \times \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 (C_{1,\theta}(i+ceil(x/2),j+ceil(y/2)))^2 \quad (2)$$

## 2.3 频率掩蔽

如上所述,随着小波子带层次的增加,高频子带记录的图像纹理的跨度也越大,其所产生的掩蔽作用会随之下降。另外,纹理的方向不同,所表现出来的掩蔽效果也各不相同。Lewis<sup>[8]</sup>对四尺度小波子带给出了频率掩蔽函数,本文将其记为  $f_{\lambda,\theta}$ ,再结合式(1)和(2)定义如下图像掩蔽强度计算公式:

$$m(x,y)=f_{1,1} \times I(x,y) + \sum_{\theta=2}^4 (f_{1,\theta} \times t(\theta,x,y)) \quad (3)$$

人眼对彩色变化的感觉要比亮度变化复杂得多,对彩色图像进行质量评价还需要考虑色彩对人眼的掩蔽。

## 2.4 色彩掩蔽

与人们对色彩的认知习惯相同,一幅真彩色数字图像可用分别代表  $R, G$  和  $B$  灰度的三个矩阵来表示。一幅  $RGB$  图像就是一个  $M \times N \times 3$  的数组,按照惯例,形成一幅  $RGB$  图像的三个矩阵常称为红、绿、蓝分量。将上述式(3)应用到彩色图像中,分别对图像的  $R, G$  和  $B$  分量计算掩蔽强度值,得到  $m(c,x,y)$ ,其中  $c \in \{R, G, B\}$ 。

实验表明人眼对这三种颜色的变化感知敏感性并不相同,其中对蓝色变化敏感性最低,对绿色变化敏感性最高。

除  $RGB$  彩色模型之外,常用的彩色模型还有  $NTSC$  彩色模型。 $NTSC$  彩色制式在美国用于电视系统。这种形式的一个主要优势是灰度信息和彩色信息是分离的,所以同一个信号既可以用于彩色电视机,又可用于黑白电视机。在  $NTSC$  制式中,图像数据是由三部分组成的:亮度( $Y$ )、色调( $I$ )和饱和度( $Q$ ),其中亮度分量描述灰度信息,是图像中三颜色分量能量的集中,其他两个分量携带电视信号的彩色信息。 $YIQ$  模型中几个分量都是利用如下变换从一幅图像的  $RGB$  分量中得到的:

$$\begin{bmatrix} Y \\ I \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ 0.596 & -0.274 & -0.322 \\ 0.211 & -0.523 & 0.312 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (4)$$

由式(4)知  $Y=0.299 * R+0.587 * G+0.114 * B$ ,该方程中三个系数反映了人眼对三种颜色的敏感程度。实验表明,当加权比例选取为  $R : G : B=2 : 1 : 4$  时,对于保证图像质量最为有利<sup>[10]</sup>。因此在图像质量评价中,我们采用这一比值对三个颜色分量的掩蔽值进行加权,定义彩色图像掩蔽强度( $JNCD$ )计算公式为:

$$jncd(c,x,y)=\begin{cases} \frac{2}{7}m(c,x,y), & c \text{ 为 } R \\ \frac{1}{7}m(c,x,y), & c \text{ 为 } G \\ \frac{4}{7}m(c,x,y), & c \text{ 为 } B \end{cases} \quad (5)$$

图像中像素的掩蔽强度反映了其所能允许的修改幅度,掩蔽强度越大,像素所允许的修改幅度也越大。同等幅度的修改加在掩蔽强度越大的像素上,所表现出的图像质量的下降越小。因此可以此为依据为图像中各像素设定相应的质量贡献权值。

## 3 基于 DWT 的彩色图像水印视觉不可感知性评价方法

对一幅  $M \times N$  的灰度图像,较为常用的客观评价方法是峰值信噪比( $PSNR$ ),计算公式为:

$$PSNR=10\lg\left(\frac{255^2}{\frac{1}{M \times N} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N e^2(x,y)}\right) \quad (6)$$

其中  $e(x,y)$  为待测图像与原始图像之间的差值。对应于彩色图像, $PSNR$  的表达式可表示为<sup>[10-13]</sup>:

$$PSNR=10\lg\left(\frac{3 \times M \times N \times 255^2}{\sum_{c=R,G,B} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N e^2(c,x,y)}\right) \quad (7)$$

其中  $c \in \{R, G, B\}$ ,表示  $e$  所属的色彩分量。由式(7)可以看出  $PSNR$ (为了叙述方便,本次及以后提到的  $PSNR$  均指式(7))是通过计算原图像与待测图像之间的差值总和来判定待测图像质量的,因此它们不能区分局部像素有较大灰度差别和较多像素有较小灰度差别的情况;第二, $PSNR$  对图像中不同亮度与纹理区域的同等幅度的差值同样对待,没有考虑图像中亮度和纹理对人眼的掩蔽;第三, $PSNR$  没有考虑不同颜色对人类视觉的掩蔽作用。因此其判定结果往往不能与人眼的感觉相一致。

考虑人类视觉的掩蔽特性,结合式(5)和式(7),对  $M \times N$  的  $RGB$  彩色图像  $I$  及其水印化图像  $I'$ ,我们定义峰值信噪比计算公式为:

$$MPSNR=10\lg\left(\frac{3 \times M \times N \times 255^2}{\sum_{c=R,G,B} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N (p(c,x,y) \times e^2(c,x,y))}\right) \quad (8)$$

其中: $p(c,x,y)$  为  $c \in \{R, G, B\}$  颜色分量中  $(x,y)$  位置掩蔽权值,其计算公式为:

$$p(c,x,y)=\frac{\beta}{1+jncd(c,x,y)} \quad (9)$$

式(9)中  $jncd(c,x,y)$  为式(5)计算所得掩蔽强度值, $\beta$  为调节因子,可视实际情况而定。

## 4 仿真实验结果与分析

构造实验方案,分别对图像“lena”,“baboon”,“f16”和

“peppers”进行测试,以检验 MPSNR 的适应能力与评价性能。原始图像如图 1 中(a)–(d)。

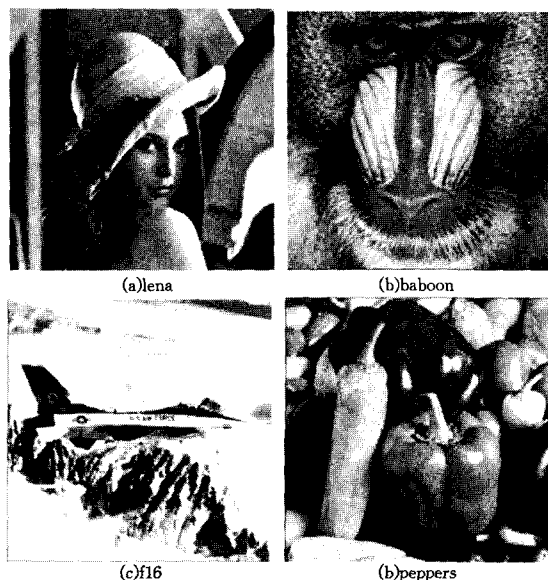


图 1 原始图像

实验一

文献[12]中给出了一个极为鲁棒的彩色图像空域水印算法,水印序列为伪随机序列  $w(i) \in \{0, 1\}$ ,利用密钥生成 1000 个随机地址,用文献[12]中幅度调制方法及嵌入公式对水印序列调制后嵌入图像蓝色分量。调整嵌入强度  $\alpha$  从 0.01 到 2 变换,可产生一组水印化彩色图像,分别利用 PSNR 和 MPSNR 对其质量进行评价,考察 MPSNR 的判定结果。图 2 和表 1–4 是实验结果和数据。

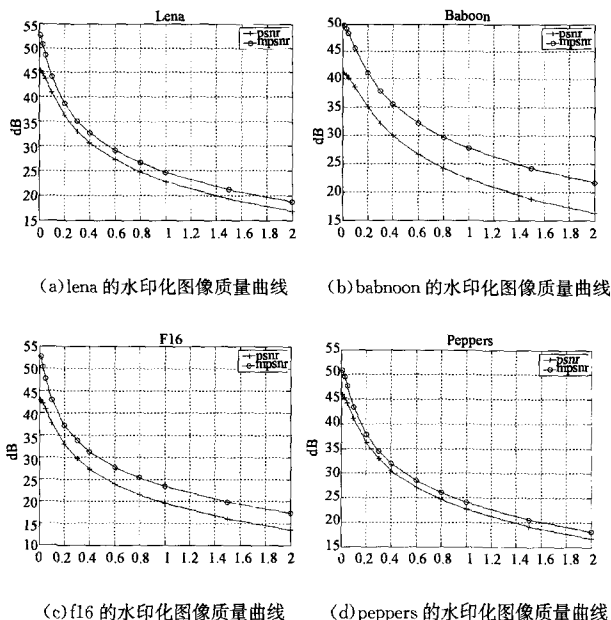


图 2 PSNR 和 MPSNR 随  $\alpha$  的变动曲线

表 1 Lena 水印化彩色图像的 PSNR, MPSNR 及其差值

$\alpha$	0.01	0.05	0.1	0.6	1.0	2.0
PSNR	45.278	43.718	40.862	27.185	22.795	16.795
MPSNR	52.559	48.635	44.082	29.131	24.707	18.692
MPSNR-PSNR	7.2808	4.9176	3.2195	1.946	1.9121	1.8966

表 2 Baboon 水印化彩色图像的 PSNR, MPSNR 及其差值

$\alpha$	0.01	0.05	0.1	0.6	1.0	2.0
PSNR	41.024	40.272	38.575	26.594	22.269	16.3
MPSNR	49.703	48.295	45.606	32.094	27.707	21.709
MPSNR-PSNR	8.6787	8.0231	7.0303	5.5001	5.4384	5.4087

表 3 f16 水印化彩色图像的 PSNR, MPSNR 及其差值

$\alpha$	0.01	0.05	0.1	0.6	1.0	2.0
PSNR	42.771	40.863	37.734	23.876	19.49	13.496
MPSNR	52.761	47.76	42.85	27.759	19.819	17.323
MPSNR-PSNR	9.9903	6.8963	5.1157	3.8828	3.8459	3.8268

表 4 peppers 水印化彩色图像的 PSNR, MPSNR 及其差值

$\alpha$	0.01	0.05	0.1	0.6	1.0	2.0
PSNR	45.933	44.134	41.014	27.065	22.666	16.662
MPSNR	50.86	47.641	43.376	28.533	24.105	18.087
MPSNR-PSNR	4.9267	3.5071	2.3626	1.4672	1.4393	1.4247

图 2 中横坐标为  $\alpha$ ,纵坐标为视觉质量(dB)。从图 2 和表 1–4 中可以看出, MPSNR 值随水印嵌入强度  $\alpha$  的增加逐渐减小,说明 MPSNR 对水印嵌入强度具有判断力。第二, MPSNR 的计算结果均高于 PSNR 的计算结果。但“baboon”的 MPSNR 值较 PSNR 的提高幅度高于“lena”,“f16”和“peppers”的提高幅度,这是由于 MPSNR 考虑了纹理掩蔽的作用,因此对纹理复杂的“baboon”给出了更好的评价结果。第三,“f16”与“lena”和“peppers”的纹理复杂程度接近,但亮度大于“lena”和“peppers”,因此“f16”的 MPSNR 较 PSNR 的提高幅度也大于“lena”和“peppers”。这正好与人眼的视觉感觉相一致。由此可以断定 MPSNR 具有一定的质量判定能力,且评价结果优于 PSNR。

实验二

为了检验色彩对水印的掩蔽以及 MPSNR 对在这种掩蔽下产生的水印化图像质量进行判断的准确性,利用与实验一中同样的水印算法再分别对 R 分量和 G 分量进行水印嵌入,同样设定嵌入强度  $\alpha$  为 0.01~2,这样对每一原始图像又可得两组水印化彩色图像。

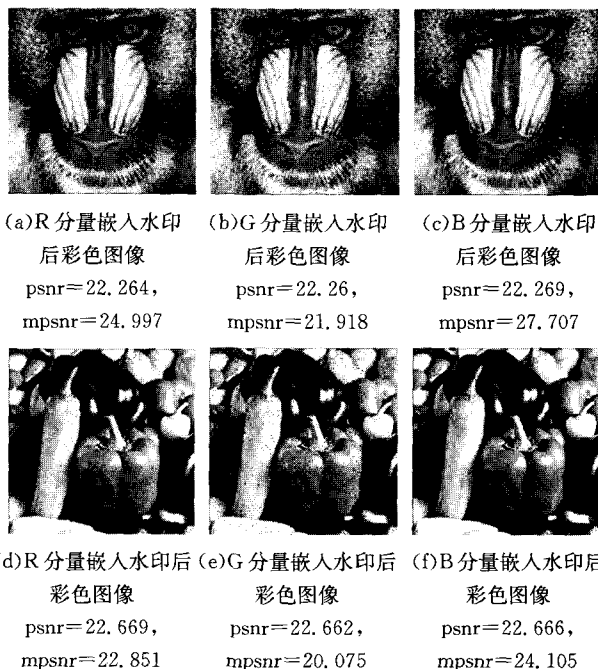


图 3  $\alpha=1$  时分别对“baboon”和“peppers”的三个颜色通道进行水印嵌入产生的水印化彩色图像

由于篇幅所限,图3中仅列出了 $\alpha=1$ 时,分别对“baboon”和“peppers”的三个不同颜色分量进行水印嵌入后得到的6幅水印化彩色图像及其PSNR和MPSNR质量分贝值。图4给出了4幅原始图像的各自三组水印化图像的PSNR和MPSNR随 $\alpha$ 的变动曲线图。图中横轴为 $\alpha$ ,纵轴为质量分贝(dB),Xpsnr和Xmpsnr分别表示当水印嵌入图像的X分量时产生的水印化彩色图像的PSNR和MPSNR分贝,X代表颜色分量,可以是R,G或B。

分别用人眼、PSNR和MPSNR对图3中水印化图像进行质量评价,比较PSNR和MPSNR的判断准确性。

①人眼的判断结果:图3(c)和图3(f)的图像质量最佳,图3(a)和图3(d)次之,图3(b)和图3(e)最差。

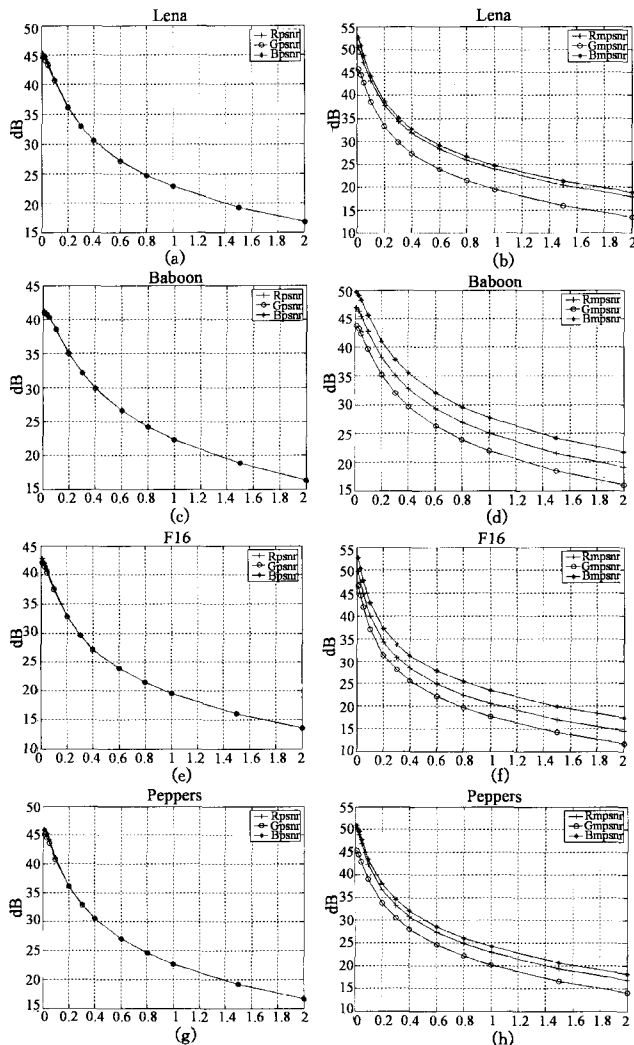


图4 水印化彩色图像随 $\alpha$ 的质量变动曲线( $\alpha=0.01\sim 2$ )。(a)和(b)分别为lena的PSNR和MPSNR曲线;(c)和(d)分别为baboon的PSNR和MPSNR曲线;(e)和(f)分别为f16的PSNR和MPSNR曲线;(g)和(h)分别为peppers的PSNR和MPSNR曲线

②PSNR的判断结果:先看lena的三个水印化图像,图3(a)、图3(b)和图3(c)的质量分别为22.264,22.26和22.269,三个值非常接近,这说明PSNR给出的质量评价结果是三幅图像具有同等质量等级,这显然与人眼的感觉不相符合。从对baboon的实验中可以得到同样的结论。

③MPSNR的判断结果:图3(c)的质量值为27.707,质量

最好;图3(a)的质量为24.997,质量次之;图3(b)的质量值为21.918,质量最差。MPSNR对lena的三个水印化图像给出了三个明显不同的质量等级值,且与人眼的判定完全一致。这一结论也可从对baboon的实验结果中得出。

再结合图4中曲线图,可进一步证明上述结论。

由此可以得出结论:本文所提出的质量评价模型MPSNR明显优于PSNR,其评价结果与人眼评价结果一致,能够反映图像的真实视觉感知质量。

**结束语** 考虑图像中背景亮度、纹理、频率以及色彩对视觉敏感性的影响,本文提出了一个彩色图像质量评价模型。通过计算图像中各像素的掩蔽强度,为图像像素设定不同的质量掩蔽强度权值。实验证明,本文所提模型能够更好地估值水印化图像的降质程度,其评价结果明显优于传统PSNR的评价结果,更加接近人眼的感觉,可对不同的水印算法进行不可感知性能评价,对数字水印技术的研究与应用具有一定的价值。

## 参考文献

- [1] Kutter M, Petitcolas A P. A fair benchmark for image watermarking systems[C]// Electronic Imaging '99. Security and Watermarking of Multimedia Contents. San Jose, CA, 1999, 3657:226-239
- [2] Cox I J, Kilian J, Leighton T, et al. Secure spread spectrum watermarking for Multimedia[C]. IEEE Trans Image Processing, 1997, 6(12):1673-1687
- [3] Kutter M, Jordan F, Bossen F. Digital signature of color images using amplitude modulation [A]// Proc. SPIE Storage and Retrieval for Image and Video Databases. V San Jose, SPIE[C], 1997:518-526
- [4] 李晓强,薛向阳. 基于多通道的彩色图像水印方案[J]. 计算机学报, 2004, 27(9):1238-1244
- [5] 卢伟,卢宏涛. 基于幅度调制的彩色图像水印[J]. 计算机工程, 2005, 31(18):140-142
- [6] 伯晓晨,沈林成,常文森. 基于拉普拉斯分布模型的DCT域图像水印视觉可见性评估[J]. 电子学报, 2003, 31(1):33-36
- [7] 田红鹏,马苗. 基于灰色关联理论的水印透明性评价算法[J]. 计算机工程与应用, 2003, 23:66-68
- [8] Lewis A S. Image compression using the 2-D wavelet transform [J]. IEEE Transaction on Image Processing, 1992, 1(2):244-250
- [9] Safranek R J, Johnston J D. A perceptually tuned sub-band image coder with image dependent quantization and post-quantization data compression[A]// International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing [C]. Glasgow UK, May 1989:1945-1948
- [10] 王向阳,杨红颖,陈利科. 基于人眼视觉系统的自适应量化数字水印算法研究. 小型微型计算机系统, 2005, 26(9):1525-1529
- [11] Hassan M H, Gilani S A M. A fragile watermarking scheme for color image authentication[J]. Transactions on emgineering, computing and technology, 2006, 13:312-316
- [12] 卢伟,卢宏涛. 基于幅度调制的彩色图像水印. 计算机工程, 2005, 31(18):140-142
- [13] 李红蕾,凌捷,徐少强. 关于图像质量评价指标PSNR的记注. 广东工业大学学报, 2004, 21(3):74-78