

文章编号:1007-2780(2011)02-0234-07

一种利用人眼视觉特性的数字图像水印技术

申 静

(陕西理工学院 计算机科学与技术系, 陕西 汉中 723000, E-mail:shenjingyjc@yahoo.com.cn)

摘 要: 结合人眼对比度敏感视觉特性和图像特征,提出一种基于人眼视觉特性的频谱图的不同频率下最小可觉察误差阈值的计算方法,利用阈值来决定水印的嵌入和提取,设计水印方案并通过实验进行验证和攻击测试。结果表明,在 JPEG 压缩质量因子大于 30%时,峰值信噪比均大于 30 dB,隐蔽性较好;相似度在压缩质量因子为 20%的情况下还能达到 0.653 9,且从直观上看,提取的水印仍能清晰可见。

关 键 词: 水印;数字图像;人眼视觉特性;最小可觉察误差阈值;傅立叶变换

中图分类号: TP309; TP391 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3788/YJYXS20112602.0234

Digital Image Watermarking Technology Based on Human Vision Characteristics

SHEN Jing

(Department of Computer Science and Technology, Shaanxi University of Technology,
Hanzhong 723000, China, E-mail:shenjingyjc@yahoo.com.cn)

Abstract: Based on the contrast sensitivity characteristics of human vision system and image features, a method was proposed to calculate the just noticeable difference thresholds of different frequencies of spectrum image. The thresholds was utilized to determine the watermark embedding and extraction. The watermarking scheme was designed, validated by experiment, and tested by attack, the results show that the peak signal noise ratio are all larger than 30 dB when JPEG compression quality factor is bigger than 30%, which indicates that the watermarks are well concealed. Normalized correlation value could still get to 0.653 9 under the case of compression quality factor of 20%, and the extracted watermarks could still clearly be seen intuitively.

Key words: watermarking; digital image; human vision characteristics; just noticeable difference threshold; Fourier transform

1 引 言

随着计算机网络的迅速发展和数字媒体的广泛应用,越来越多的信息通过网络进行传输,因此对数字媒体的版权保护、认证、注释、隐蔽通信和使用控制也显得日益重要。数字水印是一种新的数

字媒体保护技术,它是将特定的信息(如版权信息、序列号、公司标志、有意义的文本等)嵌入到图像、语音、视频等各种数字媒体中,这种信息的嵌入不影响主媒体的使用价值,不容易被人的知觉系统觉察且通过特定的恢复方法能提取出原来嵌入的信息,通过提取这些隐藏的信息以确认内容的创建者

收稿日期: 2010-10-25; 修订日期: 2010-12-14
基金项目: 国家自然科学基金(No. 10447005);陕西省教育厅专项科研基金(No. 2010JK464)
作者简介: 申静(1981—),女,山东微山人,硕士,讲师,主要从事图像处理和信息安全方面的研究。

和购买者,检测其真实性、完整性,以达到版权保护等目的。与传统的加密方法相比较,数字水印技术有更好的应用前景,近些年来引起了人们的高度重视,并逐步成为信息研究领域的一个热点^[1-5]。

数字水印技术的关键是嵌入策略、嵌入强度及嵌入后的透明性、鲁棒性、安全性等^[3-5]。水印的嵌入策略和嵌入算法有很多。由于含水印图像的最终观察者是人,人眼能很好地直接评估嵌入和提取水印结果的好坏,所以结合人眼视觉感知特性是近些年研究的一个重点^[6-9];但是,目前关于如何利用人眼视觉特性方面的研究还比较少。本文结合人眼对比度敏感视觉特性和图像特征,提出一种基于人眼视觉特性的频谱图的不同频率下人眼视觉系统可察觉到的最小变化(最小可觉察误差,Just Noticeable Difference,JND)阈值的计算方法,利用计算出的 JND 阈值来确定原始图像频谱图的各个部分所能嵌入水印信息的最大值,使得水印嵌入量达到最大,达到提高水印鲁棒性的目的;同时,又因为结合了人眼视觉特性,保证了水印的不可见性。实验验证和攻击测试结果表明,在 JPEG 压缩质量因子(Quality Factor,QF)大于 30%时,峰值信噪比(Peak Signal Noise Ratio,PSNR)均大于 30 dB,隐蔽性较好;相似度(Normalized Correlation,NC)在压缩 QF 为 20%的情况下,还能达到 0.653 9,且从直观上看,提取的水印仍能清晰可见。

2 人眼视觉特性与 JND 计算方法

数字图像水印实质上是在一个图像信号中加入另一个噪音信号,对变换域系数进行修改,对应地在空间域中表现为图像的亮度和色度的变化,即产生了亮度和色度误差。若是在不影响视觉观察效果的前提下,能够最大限度地改变图像像素值的大小,且满足剪切、JPEG 压缩和滤波等攻击对鲁棒性的要求,则加入的噪音信号便是一个好的水印信号。为达到这一要求,需要知道图像每一个像素可容忍的误差水平,对于水印观察效果来说,即是表示人眼不能觉察的最大图像失真,也叫最小可觉察误差(JND 阈值)^[9]。在水印研究中,要获得 JND 阈值最好的方法是结合人眼视觉特性。

2.1 人眼视觉特性

在图像处理的实际应用中,因为图像一般都包括边缘和形状的细节信息,所以有必要从图像

的空间频率特性上研究视觉对比的感知特性,即要研究人眼视觉系统(Human Vision System,HVS)的空间传递特性^[6]。人眼对比度敏感是描述视觉系统空间特性的主要指标,对比度敏感函数(Contrast Sensitivity Function,CSF)反映的是不同条件下的对比度敏感与空间频率之间的关系。由于对比度敏感数据无法直接测量,所以实验中一般采用心理物理学测定阈值的办法来确定人眼对比度觉察阈值,得到的阈值取倒数即为人眼对比度敏感值;然后,对不同空间频率下的对比度敏感值进行分析、拟合,便可得到 HVS 的数学模型。目前存在很多 CSF 数学模型,其中最具有代表性的有 Movshon 模型、Barten 模型和 Daly 模型^[10-13]。在图像处理中一般采取 Movshon 模型,但其涉及到的影响参数太少,不能很好地反映人眼视觉特性;Daly 模型是一种到目前为止最能反映人眼视觉特性的模型,但是计算量太大,在图像处理中不实用;综合考虑图像处理的需要和能否较好地反映人眼视觉特性,Barten 模型是比较理想的模型。Barten 模型如式(1)所示:

$$K_{CSF} = \frac{1}{M_t(f)} = a \cdot f \cdot \exp(-b \cdot f) \times [1 + c \cdot \exp(b \cdot f)]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

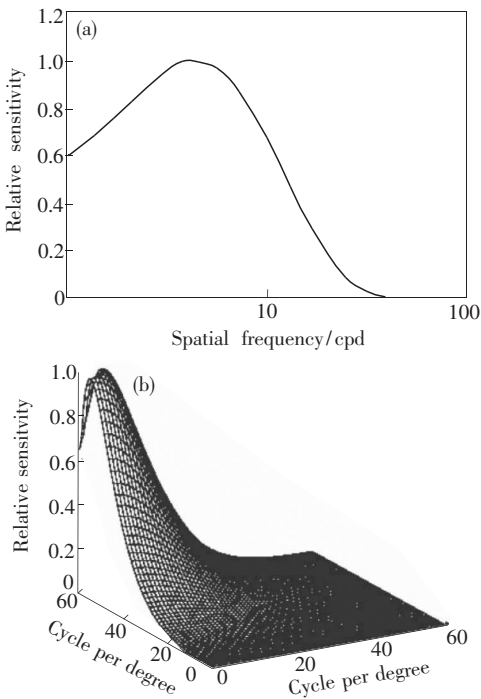


图 1 Barten CSF 模型。(a) 二维图像;(b) 三维图像。
Fig. 1 Barten CSF model. (a) Planar image; (b) Three-dimensional image.

式中, $a = \frac{540 \cdot (1+0.7/L)^{-0.2}}{1+\frac{12}{w \cdot (1+f/3)^2}}$, $b = 0.3(1+100/L)^{0.15}$, $c = 0.06$ 。其中: f 为空间频率, 单位为周/度(cpd); w 为每度显示的大小; L 为平均显示亮度。

当平均亮度不同时, 对比度敏感函数的曲线也会不同。图 1 是该模型的示意图。图 1 表明人眼在中频区域表现较为敏感, 随着频率的增加, 敏感度下降较快, 在低频区域, 敏感曲线下降缓慢。

2.2 JND 计算方法

要将描述人眼视觉系统特性的 Barten 模型与水印技术有效地结合起来, 即利用 Barten 模型计算频谱图的 JND 阈值, 则首先要解决以下两个问题:

(1) 人眼对比度觉察阈值中的对比度在图像中如何定义。人眼对比度觉察阈值的测量一般采用光学的方法来控制光栅的亮度 and 对比度, 采用心理物理学测定阈值的方法进行核定, 即目标刚能为人眼觉察时所需要的最低调制度。光栅对比度采用 Michole 提出的亮度对比度定义^[10-11, 13]:

$$C = \frac{\Delta L}{\bar{L}} \quad \bar{L} = \frac{L_2 + L_1}{2}$$
$$L_2 = \bar{L} + \Delta L/2 \quad L_1 = \bar{L} - \Delta L/2 \quad (2)$$

其中 L_1 、 L_2 分别为两光栅的亮度, $\bar{L}$ 为整个光栅的平均亮度。为了在图像水印中得到应用, 对式(2)做一个改进: 取整个图像的平均亮度作为 $\bar{L}$ 的值, 图像的任意一个像素点或任意一个小的区域的亮度与 $\bar{L}$ 的差值为 ΔL , 则其对比度均可用式(2)来描述。

(2) 图像中的空间频率如何应用到 CSF 中。在图像处理中, 空间频率常用周期/像素来描述, 但在人眼视觉特性研究中, 空间频率是指每度视角内刺激的亮暗光栅的周数, 一般用周/度(cycle per degree, cpd)来描述^[10-11, 13]。结合用显示器显示光栅对人眼对比度敏感视觉特性的实际测量, 两频率可用以下的方法来换算。

在人眼视觉特性的测量中, 光栅一般大小不变, 改变光栅周期条纹的宽度可以实现光栅频率的改变。图 2 为视角的示意图, 式(3)为视角的计算公式:

$$\alpha = 2\arctan \frac{W}{2D} \cdot \frac{180}{\pi} \approx$$
$$2 \cdot \frac{W}{2D} \cdot \frac{180}{\pi} = \frac{W}{D} \cdot \frac{180}{\pi} \quad (3)$$

其中, W 是光栅图像的宽度, D 为观察者距离显示器的距离。由于是在显示器上进行实验, W 不便于测量, 但可通过像素值换算得到。

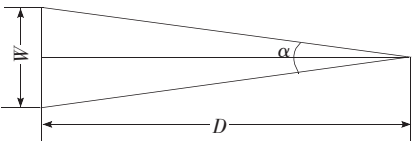


图 2 视角示意图
Fig. 2 Image of viewing angle

图像的分辨率 K 指每英寸所含的像素数, 一般为固定值, 而 $1\text{ in} \approx 2.54\text{ cm}$, 所以, W 和每个像素所占的空间大小 Δl 可表示为:

$$W = \frac{M_w}{K} \cdot 2.54 \quad \Delta l = \frac{2.54}{K} \quad (4)$$

其中, W 单位为 cm , M_w 为图像宽度的像素数。

结合图像的特征和视觉研究的实际情况, 图像的空间频率(cpd)可用式(5)来描述:

$$f = \frac{W/2}{n\Delta l/2} \cdot \frac{1}{\alpha} = \frac{M_w}{n} \cdot \frac{1}{\alpha} =$$
$$\frac{M_w}{n} \cdot \frac{100D\pi}{180W} = \frac{100D\pi}{180n\Delta l} \quad (5)$$

其中 n 为图像中某一像素或区域坐标位置($n \geq 2$)。根据上面的方法并结合式(1)、(2)和(5), 便可以计算出图像每一像素位置的人眼对比度敏感阈值, 即 JND 阈值。而数字图像水印即是改变原图像像素的数值, 只要改变值不超过阈值, 人眼便不能觉察到, 而且改变越大, 水印容量越大, 则水印效果就越好。

3 傅立叶变换

傅立叶变换在实际应用中有非常明显的物理意义, 从物理效果看, 傅立叶变换是将图像从空间域转换到频率域, 其逆变换是将图像从频率域转换到空间域。换句话说, 傅立叶变换的物理意义是将图像的灰度分布函数变换为图像的频率分布函数, 傅立叶逆变换是将图像的频率分布函数变换为灰度分布函数。图像的频率是表征图像中灰度变化剧烈程度的指标, 是灰度在平面空间上的梯度。

傅立叶变换使得能通过频率成分来分析一个函数。离散傅立叶变换使得数学方法与计算机技术建立了联系, 对于 $M \times N$ 的二维离散图像 $f(x, y)$, 傅立叶变换公式如下:

$$F(u,v) = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x,y) \exp \left[-j2\pi \left(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N} \right) \right] \quad (6)$$

$$f(x,y) = \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} F(u,v) \exp \left[-j2\pi \left(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N} \right) \right] \quad (7)$$

其中, u 和 x 取 $0, 1, 2, 3, \dots, M-1$; v 和 y 取 $0, 1, 2, 3, \dots, N-1$ 。

在实际操作中, $f(x,y)$ 和 $F(u,v)$ 均用图像进行显示, 且 $F(u,v)$ 显示的频谱图以 $|F(u,v)|$ 作为亮度显示在屏幕上; 由于离散傅立叶变换运算非常慢, 一般对算法进行改进, 用快速傅立叶变换进行实现; 常用的傅立叶正反变换公式都是以零点为中心的公式, 其变换结果的中心最亮点在图像的左上角, 作为周期性函数其中心最亮点将分布在四角, 这与正常的习惯不同, 因此, 需要把图像的零点移到显示的中心。

4 水印方案算法设计

水印嵌入方案的好坏关键在于嵌入的水印信息的不可预测性, 本方案主要是利用计算的 JND 阈值筛选图像中不同位置像素能否嵌入水印信息以及嵌入的水印是否能使原图像信息值改变最大。水印的嵌入和提取流程如图 3 和图 4 所示, 其具体步骤如下:

(1) 对水印进行 Arnold 置乱处理。利用 Arnold 置乱算法可将水印图像各像素的次序打乱, 将置乱的水印图像信息作为秘密再进行隐藏, 可以很大程度上提高原始信息的鲁棒性;

(2) 对原始图像进行离散傅立叶变换, 并把图像的零点移到显示的中心;

(3) 结合式 (1)、(2)、(5) 计算图像的 JND 阈值;

(4) 把水印图中每一个像素值与所有的 JND 阈值做比较, 找出其在经 DFT 变换后的频谱图中

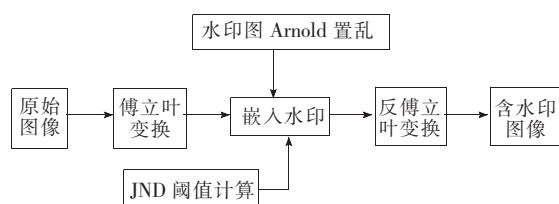


图 3 水印的嵌入流程图

Fig. 3 Flowchart of watermark embedding process

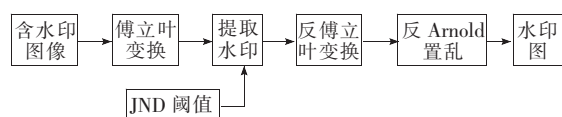


图 4 水印的提取流程图

Fig. 4 Flowchart of watermark extraction process

适合嵌入的位置坐标, 比较这些位置嵌入量的大小, 选取原始图像傅立叶变换系数改变最大的位置进行嵌入。

(5) 经离散傅立叶反变换, 恢复得到已嵌入水印信息的图像;

(6) 根据上面的逆过程实现水印的提取。

5 实验结果和攻击测试

5.1 实验

为了客观评价含水印图像的质量, 采用峰值信噪比 PSNR 来评价原图像和载入水印图像之间的差别。根据 HVS 特性, 当 PSNR 大于 30 dB 时, 水印的隐蔽性较好, 且 PSNR 越大, 水印的隐蔽性越好。采用相似度 NC 值来定量分析提取的水印和原始水印的相似程度。同样 NC 越大, 提取的水印与原始水印越相似, 水印质量越好^[9, 14-16]。

式(8)为峰值信噪比 PSNR 的计算公式。其中 I 代表原始图像, I' 代表含水印图像。

$$K_{\text{PSNR}} = 10 \times \log_{10} \frac{255 \times 255}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [I(i,j) - I'(i,j)]^2} \quad (8)$$

式(9)为水印相似度 NC 的计算公式。其中 W 代表原始水印图像, W' 代表提取出的水印图像。

$$K_{\text{NC}} = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N W(i,j) W'(i,j)}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N W(i,j)^2} \quad (9)$$

根据上面的方法和设计方案, 利用 MATLAB 编程进行实现, 选取大小为 100×100 的灰度图 Lena 图作为原始信号, 大小为 40×40 的卡巴斯基杀毒软件标志作为水印信号, 得到结果如图 5 所示。计算得到其 PSNR 值为 47.687 4 dB, NC 值为 0.998 2, 表明该水印的隐蔽性非常好, 提取的水印和原始水印几乎是一样的, 而且从人

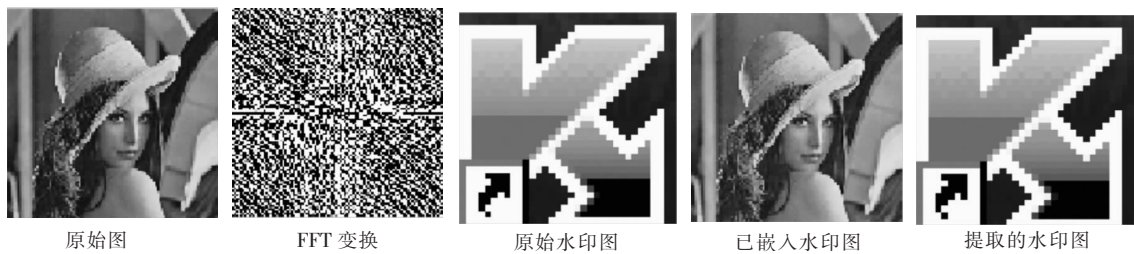


图 5 水印的嵌入和提取实验结果

Fig. 5 Experiment results of watermark embedding and extraction

眼视觉上不能分辨原始图和含水印图。

5.2 攻击测试

对含水印图进行不同质量因子(QF)的 JPEG

压缩和不同方位的剪切攻击测试,计算其 PSNR 和 NC 值结果如表 1 和表 2 所示,经压缩和剪切后提取的水印图像分别如图 6 和图 7 所示。

表 1 不同质量因子 JPEG 压缩攻击下的 PSNR 和 NC

Table 1 PSNR and NC values of the images under JPEG compression attack at different quality factors

QF/%	PSNR/dB	NC	QF/%	PSNR/dB	NC	QF/%	PSNR/dB	NC
20	26.677 7	0.653 9	50	31.737 9	0.824 2	70	36.185 7	0.876 9
30	27.956 7	0.735 6	60	32.187 0	0.848 3	80	38.004 6	0.883 8
40	31.713 9	0.805 1	70	36.185 7	0.876 9	90	40.245 0	0.927 2

表 2 不同位置剪切攻击下的 PSNR 和 NC

Table 2 PSNR and NC values of the images under cut attack at different position

参数	PSNR/dB	NC	参数	PSNR/dB	NC
左上角 4/25	32.954 4	0.889 4	右上角 4/25	27.890 4	0.787 2
左下角 4/25	29.336 9	0.866 3	中间任意 4/25	23.196 4	0.716 2

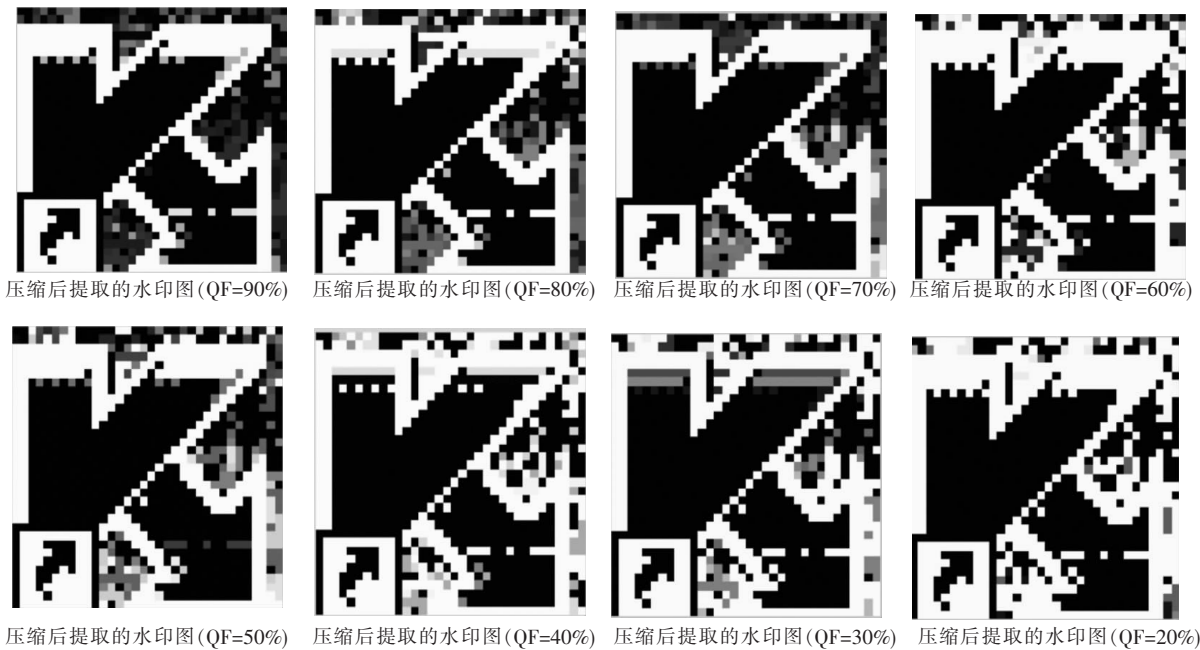


图 6 经 JPEG 压缩攻击后提取的水印图

Fig. 6 Watermark images under JPEG compression attack with different quality factors



图 7 含水印的图经剪切后的图像和经剪切攻击后提取的水印图

Fig. 7 Watermarked images by shearing attack and watermark images extracted from them

6 讨 论

由图 5 以及计算的 PSNR 和 NC 值可以看出,该水印的隐蔽性非常好,提取的水印和原始水印几乎是一样的,而且从人眼视觉上不能分辨原始图和含水印图,表明该水印方案是一种较好的方案。

从水印攻击测试计算的结果来看,在压缩攻击中,当压缩质量因子大于 30%时,PSNR 均大于 30 dB,表明隐蔽性较好;NC 虽然没有达到理想中的接近于 1,但直观地从图 6 和图 7 上看,即使压缩质量因子为 20%时,提取的水印仍然清晰可见,NC 也能达到 0.653 9,表明水印具有一定的抗压缩编码稳健性。在剪切攻击中,针对不同方位进行剪切,计算的 PSNR 在 30 dB 左右,NC 值因不同的剪切位置差异较大,四周的 NC 值差不多,而中间剪切时计算的稍偏小,但是在通常所允许

的失真范围内,水印依然能清晰可见。

7 结 论

根据人眼对比度敏感视觉特性的实际测量过程和结合图像的特征,提出了一种基于 HVS 的 JND 模型,再依据这种模型来计算频谱图的不同频率下的 JND 阈值,利用阈值来决定水印的嵌入方案,并通过实验进行了验证。实验结果表明,PSNR 几乎均大于 30 dB,NC 值在压缩质量因子为 20%的情况下,还能达到 0.653 9,而且从人眼视觉上看,提取的水印仍能清晰可见,表明文中提出的 JND 模型和水印方案是有效的,最主要是嵌入的水印具有不可预测性,有较好的抗攻击性。虽然该水印方案计算的 PSNR 和 NC 值仍有待提高,但利用 HVS 建立 JND 模型来研究水印方案是非常有意义的。

参 考 文 献:

[1] Cox I J, Kilian J, Leighton F T, et al. Secure spread spectrum watermarking for multimedia [J]. *IEEE Transactions on Image Procession*, 1997, 6(12): 1673-1687.

[2] 姚军财, 申静, 任亚杰, 等. 周围环境对人眼对比度敏感视觉特性的影响 [J]. *液晶与显示*, 2010, 25(3): 444-448.

[3] 肖亮, 韦志辉, 吴慧中. 一种利用人眼视觉掩盖的小波域数字水印 [J]. *通信学报*, 2002, 23(3): 100-106.

[4] 王志明, 章毓晋, 吴建华. 一种改进的利用人眼视觉特性的小波域数字水印技术 [J]. *南昌大学学报(理科版)*, 2005, 29(4): 400-4004.

