

一种基于 $YCrCb$ 颜色空间和视觉特性的彩色图像水印技术

姚军财

(陕西理工学院, 汉中 723000)

摘要: 根据图像离散余弦变换频谱图特征及结合人眼对亮度和颜色的对比度敏感视觉特性,提出了一种人眼感知图像最小误差即 JND 阈值的计算方法,通过计算出的 JND 阈值,提出了一种基于 $YCrCb$ 颜色空间的彩色图像水印技术方案。方案依据 JND 阈值筛选彩色图像的 3 个分量亮度图变换域频谱系数来进行水印的嵌入和提取。从水印技术方案上看,JND 阈值的引入使得水印的嵌入达到最大;嵌入算法使得水印嵌入的位置具有随机性,有力地保证了水印信息的安全性。仿真实验和攻击测试表明:含水印图经压缩攻击后的图像与原始图像基本一样,提取的水印信息与原始水印基本相同;攻击后的含水印图具有较好的透明性和较高的鲁棒性。提出的基于 $YCrCb$ 颜色空间和人眼视觉特性的彩色图像水印技术方案,是一种可行的、较好的彩色图像技术。

关键词: 图像水印; 人眼视觉特性; 离散余弦变换; 颜色空间

中图分类号: TP391; TS801.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2012)09-0111-06

Color Image Watermark Technology Based on $YCrCb$ Color Space and Human Vision Characteristics

YAO Jun-cai

(Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723000, China)

Abstract: According to the characteristics of discrete cosine transform spectrum images and the characteristics of contrast sensitivity of human vision system to brightness and color, a method was proposed to calculate a minimum error of human eye perceiving images which was JND threshold namely. By calculating the JND threshold, a color image watermark technology program was proposed based on $YCrCb$ color space. According to JND threshold, matrix coefficients of the spectrum images of three components brightness images of color image were filtered to carry out embedding and extracting watermark. From watermarking technology program, JND threshold made the watermark embedded into the maximum. Embedded watermark algorithm made the position embedded watermark random, which effectively ensured the security of watermark information. Simulation experiments and attacks tests result showed that the compressed images which were embedded watermark were basically the same with the original image; the extracted watermark is basically the same with original watermark information; the images embedded watermark after attack has good transparency and high robustness. It was concluded that the proposed color image watermark scheme based on $YCrCb$ color space and human visual system characteristics is a feasible and better color imaging technology.

Key words: image watermark; human visual system characteristics; discrete cosine transform; color space

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、隐蔽通信和使用控制也显得日益重要^[1-3]。数字水印是一种将特定的信息嵌

入到图像、语音、视频等各种数字媒体中,通过特定的恢复方法提取出原来嵌入的信息,以确认内容的创建者和购买者,检测其真实性、完整性,达到版权保护等目的的一种信息隐藏技术。作为数字媒体版权保护

收稿日期: 2012-02-16

基金项目: 国家自然科学基金(10447005);陕西省自然科学基金项目(2011JE012);教育部科学技术研究重点资助项目(212177);陕西省教育厅专项科研基金资助项目(12JK0970)

作者简介: 姚军财(1979—),男,湖北黄冈人,硕士,陕西理工学院讲师,主要从事光电图像和显示器颜色管理方面的研究。

的重要手段,数字水印技术近年来引起了人们极大的兴趣与关注,以致近些年国内外专家学者对其做了大量的研究^[4-9]。到目前为止,由于水印技术研究的多学科性和理论基础的差异性,数字水印技术仍处于探索研究阶段。普遍认为数字水印技术的关键突破点在于数字水印模型的建立问题、水印容量平衡问题、水印中结合人眼视觉特性等问题,且目前绝大多数水印算法是针对黑白图像的,只有少数涉及到彩色图像和视频信号^[4-9]。基于此,文中根据图像离散余弦变换频谱图特征及结合人眼对亮度和颜色的对比度敏感视觉特性,提出了一种基于 $YCbCr$ 颜色空间和人眼视觉特性的彩色图像水印技术方案。方案依据 JND 阈值筛选彩色图像的 3 个分量亮度图变换域频谱系数来进行水印的嵌入和提取,并通过仿真实验和攻击测试。结果表明:在不影响人眼观测效果的前提下,水印技术最大限度地实现了水印的嵌入量,更好地保证了图像的视觉透明性、鲁棒性和安全性,是一种可行的、较好的彩色图像水印技术。

1 离散余弦变换和 $YCbCr$ 颜色空间

1.1 离散余弦变换

离散余弦变换(DCT)是将图像信号从空间域变换到频率域上,分离出低频和高频信息的过程。图像的 DCT 变换较好地去掉了像素间的相关性,使得图像的信息主要集中在少数几个低频的系数上,从而去掉了一些不重要的频率系数,并且恢复的图像不影响视觉效果。对于一幅图像,其正逆离散余弦变换公式如式(1)和式(2)^[2-3]。

$$\text{正变换: } F(u, v) = C(u)C(v) \frac{2}{\sqrt{MN}} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \cos \frac{(2x+1)u\pi}{2M} \cos \frac{(2y+1)v\pi}{2N} \quad (1)$$

$$\text{逆变换: } F(x, y) = \frac{2}{\sqrt{MN}} \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} C(u)C(v)F(u, v) \cos \frac{(2x+1)u\pi}{2M} \cos \frac{(2y+1)v\pi}{2N} \quad (2)$$

1.2 $YCbCr$ 颜色空间

$YCbCr$ 颜色空间是 JPEG 采用的色彩系统,是目前图像压缩技术中广泛采用的一种颜色空间。在日常生活中,显示系统一般采用 RGB 色彩系统来表示颜色,而 RGB 颜色系统是一种依赖于显示设备的颜色空间,不同的显示仪器显示的图像效果有一定的差

别,则一般在图像技术中,先把图像从 RGB 色空间转换到与设备无关的颜色空间^[10-12]。文中提出的水印技术是先把 RGB 色空间转换到 $YCbCr$ 颜色空间,其正逆转换公式如式(3)和式(4),其中 Y 代表亮度, C_r 和 C_b 分别代表红色和蓝色的色度、饱和度。在水印技术中,人眼对亮度的觉察误差阈值比对色彩的觉察误差阈值更大,因此,图像的亮度分量是信息隐藏的主要对象,但可以对色度分量同样进行信息隐藏,以增大水印信息的容量,使得增加水印的鲁棒性。

$$\begin{cases} Y = (77/256)R + (150/256)G + (29/256)B \\ C_r = (131/256)R - (110/256)G - (21/256)B + 128 \\ C_b = -(44/256)R - (87/256)G + (131/256)B + 128 \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} R = Y + 1.402(C_r - 128) \\ G = Y - 0.34414(C_b - 128) - 0.71414(C_r - 128) \\ B = Y + 1.772(C_b - 128) \end{cases} \quad (4)$$

2 人眼视觉特性

2.1 人眼亮度对比度敏感视觉特性

人眼对比度敏感视觉特性是人眼视觉系统空间特性的主要指标之一,是图像显示、处理、理解等技术的重要理论基础^[10-12]。人眼对比度敏感视觉特性一般采用不同空间频率下的人眼对比度敏感阈值来定量描述。根据数学建模的方法,理论抽象出的空间频率与敏感阈值之间的函数关系,一般称之为“人眼对比度敏感函数(CSF)”。其中对比度敏感阈值一般根据韦伯定理采用心理物理学的方法来确定,用人眼对比度觉察阈值的倒数来表示,即用目标光栅刚好被人眼觉察而又不能完全分辨时对比度值的倒数来定量表示^[5-6,12]。对人眼对比度敏感阈值的测量及其 CSF 的研究,国内外许多专家学者从 20 世纪 30 年代就开始做了大量的工作,测量获得了许多人眼对比度敏感阈值及拟合了较多的 CSF 数学模型,但其均有一定的差异,且获得的主要是人眼亮度视觉特性,人眼彩色敏感阈值的测量及其 CSF 模型的相关研究报道比较少,且目前国内外专家学者们研究的图像技术均是利用人眼亮度敏感模型,人眼彩色视觉特性在图像技术中的应用仍处于探讨和研究之中。主要是因为颜色的多样性和没有统一的色度对比度定义,使得到目前为止还没有一个较好地反映人眼彩色视觉特性的 CSF。目前为止,只有在 1985 年 K. T. Mullen 和

Wandell 等人在同一环境中测量了人眼亮度和色度对比度敏感阈值和拟合了其 CSF,给出了完整的研究报道^[5-6,12],其拟合给出的彩色 CSF 是一个由 2 个高斯函数之和组成的三参数的对立色空间的对比度敏感函数,如式(5)所示。式中的参数见表 1,亮度 CSF 如式(6)。这 2 种模型目前也得到了眼视觉光学领域专家学者的认同。基于这 2 种模型进行图像水印技术研究。

$$CSF_{col}(f)=a_1 \cdot e^{b_1 f^{c_1}}+a_2 \cdot e^{b_2 f^{c_2}} \tag{5}$$

$$CSF_{lum}(f)=75 f^{0.2} e^{-0.8 f} \tag{6}$$

表 1 对比度敏感函数的参数值

Tab.1 The values of parameters in the equation^[5]

参数	a_1	b_1	c_1	a_2	b_2	c_2
红-绿	109.141 3	-0.003 7	3.424 36	93.597 11	-0.003 67	2.167 71
蓝-黄	7.032 845	-0.000 4	4.258 205	40.690 950	-0.103 909	1.648 658

2.2 对比度定义

在人眼视觉特性的实验研究中,目标光栅一般做成明暗条纹。光栅条纹的对比度普遍采用 Michele 提出的亮度对比度(C)定义,如式(7)^[12]。其中, L_1 和 L_2 分别表示明暗条纹的亮度。在 K. T. Mullen 和 Wandell 等人的实验中,对立色条纹的对比度定义仍以式(7)为定义基础,只是 L_1 和 L_2 分别表示两对立色颜色对应的亮度的贡献值。

$$C=\frac{\Delta L}{\bar{L}}, \bar{L}=\frac{L_2+L_1}{2}, L_2=\bar{L}+\Delta L/2, L_1=\bar{L}-\Delta L/2 \tag{7}$$

3 水印技术方案

3.1 频率关系

要利用 CSF 计算源图像变换域图像中每一频率的可容忍的最大误差(即 JND 阈值),首先要将图像变换域频谱图中的空间频率与 CSF 模型中的空间频率结合起来。在图像技术中,空间频率是指每毫米所具有的光栅数,单位为线对/mm。在视觉研究领域,它是指每度视角内刺激的亮暗正弦光栅周期数,单位是周/(°)。则人眼观察范围内的光栅目标对应的人眼观察视角的计算方法见图 1,对应的计算表达式如式(8)。其中,W 是图像的宽度,D 为观察者距离显示器的距离。视觉特性测量中亮度光栅的示意见图 2。

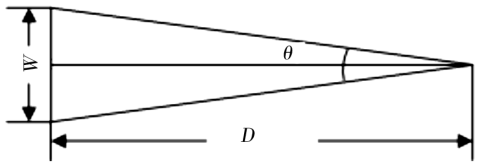


图 1 视角 θ 的计算方法示意

Fig. 1 Schematic diagram of computing viewing angle

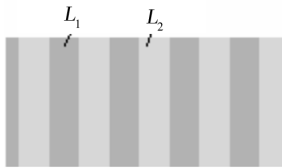


图 2 亮度光栅示意

Fig. 2 Schematic diagram of luminance gratings

$$\theta=2\arctan \frac{W}{2D} \frac{180}{\pi} \approx 2 \frac{W}{2D} \frac{180}{\pi} \approx \frac{W}{D} \frac{180}{\pi} \tag{8}$$

在人眼视觉特性的测量实验中,所有的光栅均用同一显示器显示,则每个像素所占的空间大小和整个光栅图像大小就不变,光栅的宽度可以通过调节每个光栅的像素 n 的个数实现,则空间频率的计算如式(9)。式中 W, W_i 为光栅图像的宽度,单位分别取 cm 和像素个数。

$$f=\frac{N}{\theta}=\frac{W}{n \Delta l} \frac{1}{\theta}=\frac{W_i}{n} \frac{1}{\theta} \tag{9}$$

要找出两频率之间的关系,即如何将 CSF 模型中的空间频率与频谱图 $F(u,v)$ 中的 u,v 建立联系,则通过以下作说明。图像经过 DCT 变换为频谱图 $F(u,v)$, u,v 分别表示离散系列的位置,通过实验发现,频谱图上的任意 2 点间经 DCT 反变换均呈现 1 个正弦周期条纹,若 2 点间间隔 N 个像素点,则整个光栅图像上呈现 N 个周期,表现为形成的光栅宽度为 $n=W_i/N$ 个像素,其中的一个演示见图 3。结合图像子块 DCT 变换特征,子块的直流分量为子块的平均值,在频谱图 $F(u,v)$ 中的 u,v 分别为 0,0,对应的是频谱图的第 1 个像素点,则可以代表子块的平均亮度。频谱图的其它各个点的位置 u,v 与第 1 个像素点相差 N 个像素,则在反变换中,2 点形成的正弦周期条纹所对应的光栅周期个数为 N,光栅的宽度为 W_i/N 个像素,则表明在一般的图像技术中,位置 u,v 的点对应的周期为 W_i/n ,频率为 $1/n$ 。在人眼观察图像时,人眼观察的视角为一恒定值,观察的范围认为

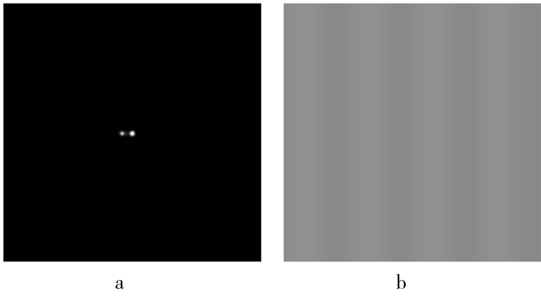


图3 在DCT变换域中保留坐标为(129,125)和(129,129)的2点经反DCT变换得到的正弦条纹图像

Fig. 3 Sine stripe image obtained by inverse DCT transform from two dots with the coordinate of (129, 125) and (129, 129) saved in DCT field

是1个子块,则整个子块上呈现的周期数目为 N ,则人眼视觉特性中的空间频率计算仍可以用式(9)进行计算。在计算任意一点(位置为 u,v)与子块形成的对比度时,可以通过以下的计算方法来计算,直流分量代表子块的平均亮度,即是对比度计算式(7)中的 $\bar{L}$ 值,位置为 u,v 的点的亮度与平均亮度的差即为 ΔL ,任意一点的对比度值可用式(7)来计算。则在人眼视觉特性研究中的对比度定义和空间频率均在图像中得到应用。

3.2 基于图像 JND 阈值的水印方案

将彩色图像从 RGB 颜色空间转化到 $YCbCr$ 色空间,转换关系式如式(3),并将彩色图像进行色度和亮度通道分离,获得亮度 Y 分量的亮度图和红绿、蓝黄色度分量的亮度图。对各分量亮度图分别进行 8×8 像素大小子块划分和 DCT 变换,获得各个子块频谱图系数矩阵。根据 K. T. Mullen 等人测量 CSF 的实际过程,找出频谱图中的频率与人眼视觉特性模型中的空间频率之间的关系,计算出 8×8 像素大小子块频谱图中每一系数值对应的空间频率,组成同等大小的空间频率矩阵 M_{cpd} 。利用 K. T. Mullen 等人拟合的 CSF 模型,计算出空间频率矩阵中每个空间频率的人眼亮度和色度对比度觉察阈值 C 。利用阈值 C 和公式(7)计算出每一子块中任何一点的人眼对比度敏感阈值,即图像的 JND 阈值,再利用阈值筛选出源图像频谱图中的任何一点是否能嵌入水印信息,从而进行水印的嵌入。由于筛选具有很大的随机性,每个子块都有部分嵌入的水印信息,且每个子块嵌入的位置和容量均不相同,且同一个水印信息点可能会嵌入到多个系数位置,使得水印嵌入具有较高的安全

性。对每个子块进行反 DCT 变换,恢复各分量的亮度图,并重建组成彩色图像,再把彩色图像从 $YCbCr$ 色空间变换到 RGB 色空间,转换关系式如式(4),实现图像水印的嵌入。根据上面的逆过程实现水印的提取。水印嵌入和提取的方案见图 4 和 5。

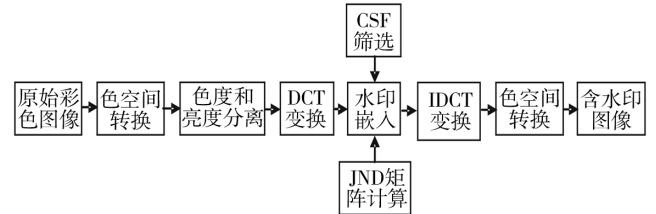


图4 水印嵌入方案流程

Fig. 4 Flow chart of watermark embedding scheme

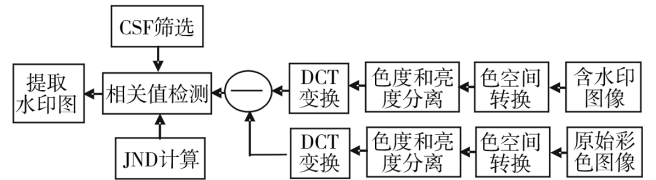


图5 水印提取方案流程

Fig. 5 Flow chart of watermark extraction scheme

4 实验结果及攻击测试

依据上面提出的水印技术方案,以标准的 Lena 图为原始彩色图像,以卡巴斯基杀毒软件的图标作为水印信息来进行仿真实验,实验结果见图 6 和 7。图 6 是把彩色图像从 RGB 色空间转换到 $YCbCr$ 色空间,并进行三色分离和子块划分以及 DCT 变换的结果。对 3 个分量亮度图各自嵌入水印后及其重建组成的彩色图见图 7,以及提取的水印信息。

在图像水印技术中,一个好的水印技术不仅要求嵌入的水印具有较高的透明性,而且具有很好的抗攻击性,即鲁棒性。分别对嵌入水印的图像进行不同质量因子 QF 的压缩和不同位置的剪切攻击测试,含水印图经剪切和压缩攻击后的图像以及从其中提取的水印信息见图 8 和图 9。

在图像水印技术中,一般采取 2 种方法来评价水印效果,即主观评价和客观评价。主观评价主要是通过人眼的观察,主观感受含水印图像和提取的水印图与原图的差异,用以来评价其好坏;客观评价主要是通过计算含水印图与原图的峰值信噪比 PSNR 和计算提取的水印信息与原水印的相似度 NC 来评价水

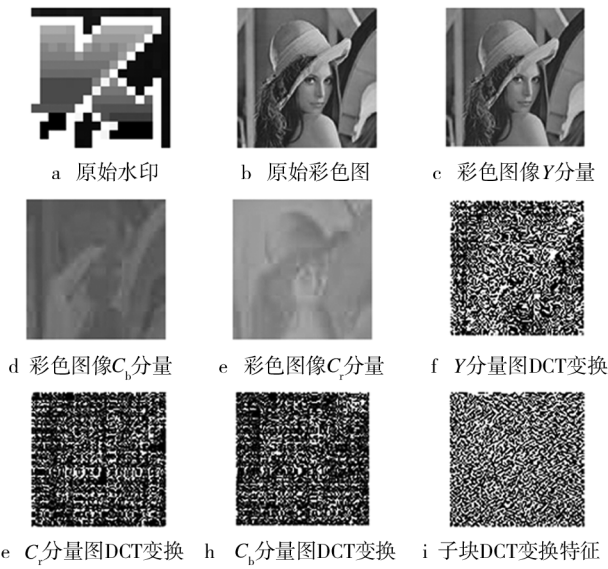


图 6 彩色图像颜色分离及其分量亮度图的 DCT 变换结果

Fig. 6 Separating color image into three components and color DCT results of brightness images of them

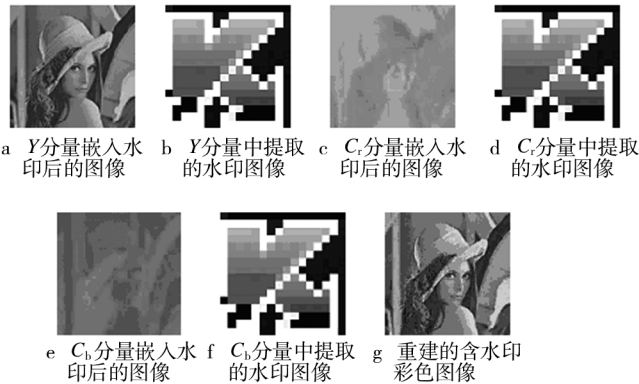


图 7 3 个分量亮度图嵌入水印的图像和从其中提取的水印信息及其重建组成的彩色图

Fig. 7 Brightness images embedded watermark, the watermark images extracted from them, and reconstructed color images

印效果的好坏^[3-6]。一般 PSNR 大于 30 dB 时,两图像的差异非常小,PSNR 越大,差异越小;NC 值越大,水印信息与原水印越相似。从主观上看,3 个分量的含水印图经压缩后的图像与原始图像基本一样,提取的水印信息与原始水印基本相同;剪切攻击后提取的水印与原始水印虽然有一定的差异,但差异比较小。从客观上,则计算攻击后的 3 个分量的含水印图与原始图像的 3 个分量亮度图的 PSNR 值,以及计算含水印图像经攻击后提取的水印与原始水印之间的相似度 NC 值(即归一化互相关系数),其结果见表 2。表 2 表明,在 $QF=80\%$ 和 $QF=50\%$ 的 2 种压缩攻击

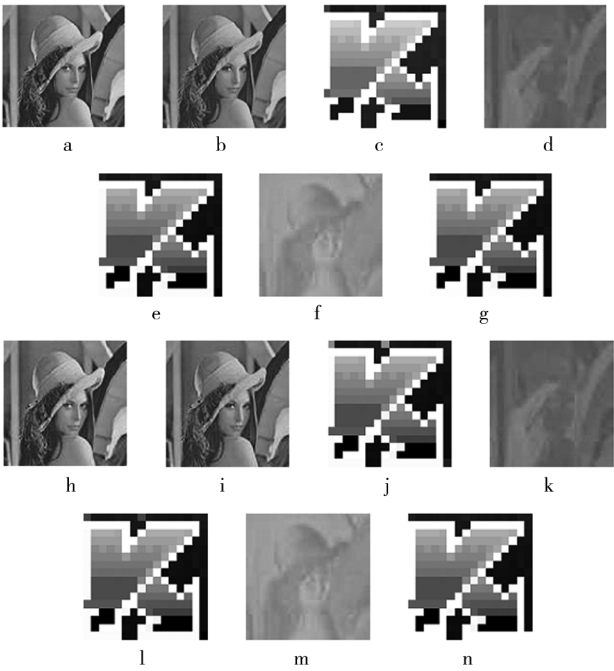


图 8 压缩攻击测试结果

Fig. 8 Test result of compression attack

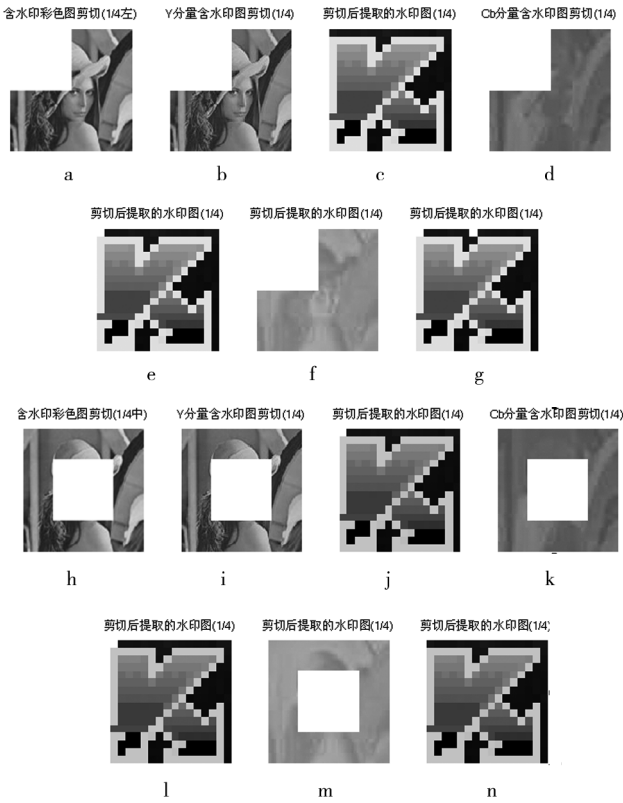


图 9 剪切攻击测试结果

Fig. 9 Test results of cutting attack

后,PSNR 均在 25 以上,NC 均在 0.95 以上;2 种不

同位置的剪切攻击后,PSNR 均在 20 以上,NC 均在 0.80 以上,即攻击后的含水印图具有较好的透明性和较高的鲁棒性。

表 2 含水印图像经压缩和剪切攻击后的 PSNR 和提取的水印图的 NC 值
Tab.2 The PSNR value of image embedded watermark after compression and cutting attack and NC value of extracted watermark

	压缩 80%			压缩 50%			剪切 左上 1/4			剪切 中间 1/4		
	Y	C _b	C _r	Y	C _b	C _r	Y	C _b	C _r	Y	C _b	C _r
PSNR	26.345 5	28.119 5	25.951 4	25.773 7	27.247 0	25.342 5	22.687 4	22.449 6	23.150 0	20.387 6	20.453 6	23.361 3
NC	0.976 8	0.983 7	0.981 2	0.952 6	0.957 9	0.968 5	0.864 6	0.883 1	0.832 4	0.810 9	0.821 3	0.838 8

从技术方案上看,由于嵌入水印点具有很大的随机性,每个子块都有部分点嵌入水印信息,且每个子块嵌入的位置和容量均不相同,且同一个水印信息点可能会嵌入到多个系数位置,使得水印嵌入具有较高的安全性。文中提出的水印技术方案是一种可行的、较好的水印技术。

5 结论

根据图像离散余弦变换频谱图特征和结合人眼对亮度和颜色的视觉特性,提出了一种人眼感知图像最小误差即 JND 阈值的计算方法,通过计算的 JND 阈值,提出了一种基于 YC_rC_b 颜色空间的彩色图像水印技术方案。从水印技术方案上看,嵌入算法使得水印嵌入的位置具有随机性,有力地保证了水印信息的安全性。通过仿真实验和攻击测试,结果表明在不影响人眼观测效果前提下最大限度地实现了水印的嵌入量。从主观上,3 个分量的含水印图经压缩后的图像与原始图像基本一样,提取的水印信息与原始水印基本相同;从客观上,攻击后的含水印图像与原图像之间的 PSNR 均在 20 以上,提取的水印图像归一化系数 NC 值均在 0.80 以上,表明攻击后的含水印图具有较好的透明性和较高的鲁棒性。综合结果表明提出的基于 YC_rC_b 颜色空间和 HVS 的彩色图像水印技术方案是一种可行的、较好的彩色图像技术。

参考文献:

[1] 黄继武,谭铁牛. 图像隐形水印综述[J]. 自动化学报, 2000,26(5):645—655.
HUANG Ji-wu,Tan Tie-niu. A Review of Invisible Image Watermarking[J]. Acta Automatica Sinica,2000, 26 (5):645—655.
[2] 杨先义,钮心忻. 数字水印理论与技术[M]. 北京:高等教

育出版社, 2005.
YANG Xian-yi,NIU Xin-yi. Theory and Applications of Digital Watermarking [M]. Beijing: Higher Education Press,2005.
[3] 傅德胜,孙文静. 一种基于人眼视觉特性和小波变换域的图像数字水印技术[J]. 计算机科学,2008,35(11):203—206.
FU De-sheng,SUN Wen-jing. Image Digital Watermarking Technique Based on Human Visual System and Wavelet Transform Domain [J]. Computer Science, 2008,35(11):203—206.
[4] 姚军财. 基于人眼视觉特性的印刷图像压缩技术研究[J]. 包装工程,2011,32(5):69—72.
YAO Jun-cai. Compression Technology of Printed Image Based on Human Vision Characteristics[J]. Packaging Engineering,2011,32(5):69—72.
[5] PELI E. Contrast Sensitivity Function and Image Discrimination J Opt Soc Am A, 2001,18(2):283—293.
[6] JOHNSON G M,FAIRCHILD M D. Darwinism of Color Image difference Models[C]// IS and T/SID the 9th Color Imaging Conference, Scottsdale, USA: Society for Imaging Science and Technology,2001:108—112.
[7] 王思,魏先福,黄蓓青. 水印防伪技术的研究及发展[J]. 包装工程,2008,29(10):134—135.
WANG Si,WEI Xian-fu, HUANG Bei-qing. Research and Development of Watermark Anti-counterfeiting Technology[J]. Packaging Engineering, 2008, 29 (10): 134—135.
[8] 薛磊,张逸新,刘春林. 数字水印技术在印刷品防伪中的应用[J]. 包装工程,2008,29(2):96—97.
XUE Lei,ZHANG Yi-xin,LIU Chun-lin. Application of Digital Watermark Technology in Forgery Detection of Printed Material [J]. Packaging Engineering, 2008, 29 (2):96—97.

- ics, 2009(10):536—542.
- [11] DERBY B. Inkjet Printing of Functional and Structural Materials: Fluid Property Requirements, Feature Stability, and Resolution[J]. *Annu Rev Mater Res*, 2010, 40: 395—414.
- [12] LEE Myung-won, LEE Mi-young, CHOI Jae-Cheol, et al. Fine Patterning of Glycerol-doped PEDOT: PSS on Hydrophobic PVP Dielectric with Ink Jet for Source and Drain Electrode of OTFTs[J]. *Organic Electronics*, 2010 (11): 854—859.
- [13] HOTH C N, CHOULIS S A, SCHILINSKY P J. High Photovoltaic Performance of Inkjet Printed Polymer: Fullerene Blends[J]. *Advanced Materials*, 2007, 19: 3973—3978.
- [14] 石利琴. 影响喷墨印刷质量的关键因素分析[J]. *包装工程*, 2005, 26(4): 44—46.
SHI Li-qin. Analysis of the Key Factors Influencing on the Ink-jet Printing Quality[J]. *Packaging Engineering*, 2005, 26(4): 44—46.
- [15] 钟艳如, 郭德伟, 黄美发. 信息熵原理在表面粗糙度 Ra 不确定度计算中的应用[J]. *机械科学与技术*, 2009 (28): 829—833.
- ZHONG Yan-ru, GUO De-wei, HUANG Mei-fa. Application of Information Entropy Principle to Uncertainty Calculation of the Arithmetic Mean Deviation of Surface Roughness[J]. *Mechanical Science and Technology*, 2009 (28): 829—833.
- [16] 刘乃玲, 张旭. 压力式细雾喷嘴雾化特性的研究[J]. *同济大学学报*, 2005(33): 1677—1679.
LIU Nai-ling, ZHANG Xu. Research on Spray Characteristics of Pressure and Fine Mist Nozzles[J]. *Journal of Tong Ji University*, 2005(33): 1677—1679.
- [17] BERTOLA V. Some Applications of Controlled Drop Deposition on Solid Surfaces[J]. *Recent Patents on Mechanical Engineering*, 2008(1): 167—174.
- [18] BERTOLA V. Drop Impact on a Hot Surface: Effect of a Polymer Additive [J]. *Experiments in Fluids*, 37 (2004): 653—664.
- [19] SOBOLEV V V, GUILLEMAN J M, MARTIN A J. Influence of Surface Roughness on the Flattening of Powder Particles during Thermal Spraying [J]. *Thermal Spray Technology*, 5(1996): 207—214.

(上接第 110 页)

- ZHAO Mei-ning, WANG Chuang, WANG Jia. Design of Auto-control System of Plastic Case Sealing Machine [J]. *Packaging Engineering*, 2007, 28(10): 83—85.
- [8] 陈宝江. 一种包装机械手气动控制系统的研究[J]. *包装工程*, 2008, 29(7): 14—16.
CHEN Bao-jiang. Research on the Pneumatic Control System of a kind of Packaging Manipulator[J]. *Packaging Engineering*, 2008, 29(7): 14—16.
- [9] 刘淑英. 基于 PLC 的集合包装机控制系统设计[J]. *包装工程*, 2009, 30(5): 47—48.
LIU Shu-ying. Design of Control System of Collective Packaging Machine Based on PLC[J]. *Packaging Engineering*, 2009, 30(5): 47—48.

(上接第 116 页)

- [9] 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.
XIAO Liang, WEI Zhi-hui, WU Hui-zhong. A Digital Watermarking in Wavelet Domain Utilizing Human Visual Masking[J]. *Journal of China Institute of Communications*, 2002, 23(3): 100—106.
- [10] 姚军财, 龚箭. CRT 显示器颜色特性化模型与实验研究[J]. *包装工程*, 2010, 31(21): 99—102.
YAO Jun-cai, GONG Jian. CRT Display Color Characterization Model and Experiment Research[J]. *Packaging Engineering*, 2010, 31(21): 99—102.
- [11] 许宝卉, 李言. 基于 ICC 标准的 CRT 色空间转换方法的研究与比较[J]. *液晶与显示*, 2009, 24(3): 438—442.
XU Bao-hui, LI Yan. Research and Comparison of CRT Color Space Conversions Based on ICC Standard of Color Management[J]. *Chinese Journal Of Liquid Crystals And Displays*, 2009, 24(3): 438—442.
- [12] 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.