

文章编号:1007-2780(2017)08-0642-08

基于人眼对比敏感视觉特性的彩色图像 盲水印算法

姚军财*

(陕西理工大学 物理与电信工程学院, 陕西 汉中 723000)

摘要:为了解决水印透明性、鲁棒性与水印容量之间的平衡问题,结合人眼对比敏感度视觉特性,提出了一种彩色图像的盲水印算法。算法首先结合人眼对比敏感度视觉特性及其模型,在频域中计算人眼感知原始图像的对比敏感度阈值;其次结合人眼对强度的感知模型,计算水印图像信息的强度感知值;然后结合嵌入强度系数值,以感知原始图像的对比敏感度阈值为水印嵌入量的门限,实现数字水印的嵌入;最后依据密钥,采用逆过程提取水印。实验结果表明,在压缩质量因子为 20%、中间剪切 1/4 区域的较强攻击下,提取水印与原水印的相似度达到 0.78 以上,且保证了较好的水印透明性。

关键词:盲水印; 彩色图像; 人眼视觉特性; 空间频率

中图分类号:P391; O432.3 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20173208.0642

Blind watermarking algorithm for colour image based on human visual contrast sensitivity characteristics

Yao Jun-cai*

(School of Physics and Telecommunication Engineering, Shaanxi University of Technology,
Hanzhong 723000, China)

Abstract: Aiming at the balance between watermarking transparency, robustness and watermarking capacity, a blind watermarking algorithm for color images is proposed based on the contrast sensitivity characteristics of human visual system (HVS) in this paper. In this algorithm, firstly, according to the contrast sensitivity characteristics of HVS and its calculation models, the contrast sensitivity thresholds from HVS perceiving the original image are calculated in the frequency field. And combined with the strength perception model of HVS, the perceived strengths of the watermarking images are calculated. Then according to the coefficients of embedding strengths, the digital watermarks are embedded by taking the contrast sensitivity perceived original images as the thresholds of the watermarks embedding quantity. Finally, based on the key, the inverse process is carried out

收稿日期:2017-03-31; 修订日期:2017-05-09.

基金项目:国家自然科学基金项目(No.61301237); 陕西省科技新星计划项目(No.2015KJXX-42)和陕西省教育厅专项科研项目(No.15JK1139)

Supported by National Natural Science Foundation of China(No.61301237); Scientific and Technological New-star Plan of Shaanxi Province, China (No. 2015KJXX-42); Specialized Research Foundation of Shaanxi Province Education Department, China(No.15JK1139)

* 通信联系人, E-mail: yjc4782@163.com

to extract the watermarks. The experimental results show that under the strong attack that the watermarked image is compressed by quality factor 20% and 1/4 size is sheared in the intermediate region of image, the similarity between the original watermarking and the extracted watermarking can reach more than 0.78. And the proposed watermarking algorithm has good transparency.

Key words: blind watermarking; color image; human visual characteristics; spatial frequency

1 引言

随着多媒体和信息技术的迅猛发展,图像技术得到了极大的应用,人们可以毫无顾忌地任意传播、篡改和复制图像,以致图像信息安全问题受到了前所未有的挑战。图像水印技术是将一些标识图像(即水印信息)嵌入到图像当中,且不影响原图像的使用价值,也不容易被觉察的一种信息隐藏技术。该技术通过隐藏的信息可以实现图像的识别、鉴定和保护等目的^[1-3]。研究一种快捷、简便、实用且准确度高的图像水印技术,具有重要的理论研究意义和实际应用价值。

国内外专家学者对图像水印技术做了大量的工作,提出了较多的算法,但是目前仍面临着较多的问题,主要包括^[3-8]:(1)如何实现嵌入水印容量与鲁棒性、透明性之间的平衡。当嵌入水印容量较大时,图像鲁棒性较高,但透明性则较差;而当嵌入水印容量较小时,透明性较好,但抗攻击性较差^[5-6]。目前在解决水印容量与鲁棒性、透明性之间的平衡关系时,大多数算法都结合人眼视觉特性,而如何有效利用人眼视觉特性目前也没有一个通用的方法;并且这种算法受人眼视觉特性测量的限制^[4-5]。(2)受存储成本的限制,目前实际应用中的研究多为盲水印研究。但盲水印嵌入容量相对较小,鲁棒性较差^[7-8]。基于此,本文提出了一种基于人眼对比敏感度视觉特性的彩色图像

盲水印算法,该算法首先在频域中,结合人眼对比敏感度视觉特性,计算人眼感知原始图像的对比敏感度阈值;其次结合人眼对强度的感知模型,计算水印图像信息的强度感知值;然后结合嵌入强度系数值,以感知原始图像的对比敏感度阈值为水印嵌入量的门限,实现数字水印的嵌入;最后依据密钥,采用逆过程提取水印。实验结果表明,在压缩质量因子为20%、中间剪切1/4区域的较强攻击下,提取水印与原水印的相似度值仍能达到0.78以上,说明本文提出的方法是一种行之有效的水印嵌入和提取方案。

2 人眼对比敏感度阈值的计算

2.1 人眼对比敏感度函数

目前解决水印透明性、鲁棒性与水印容量之间的平衡问题的一个有效方法即是结合人眼感知特性^[5,9]。人眼对比敏感度特性是四大空间视觉特性之一,一般采用对比敏感度函数 CSF (Contrast Sensitivity Function) 来定量描述。CSF 主要反映视觉敏感值与空间角频率之间的函数关系。国内外对 CSF 做了大量的研究,提出了较多的模型^[10-12]。依据 CSF 反映视觉特性的准确度及其在水印算法中的计算复杂度,本文采用了由 Barten 和 Nadenau 提出的亮度模型(记为 CSF_L)和色度模型(记为 CSF_{rg}和 CSF_{by})^[10-11]。

(1)亮度 CSF_L

$$\text{CSF}_L(f_\theta) = a \cdot f_\theta \cdot \exp(-b \cdot f_\theta) [1 + c \cdot \exp(b \cdot f_\theta)]^{0.5},$$

$$a = \frac{540 \cdot (1 + 0.7/L)^{-0.2}}{1 + \frac{12}{w \cdot (1 + f_\theta/3)^2}}, \quad b = 0.3 \cdot (1 + 100/L)^{0.15}, \quad c = 0.06, \quad (1)$$

式中: L 为光栅的平均亮度, w 为视网膜中心偏离视角, θ 为观察视角; f_θ 为角频率,其定义为单位空间视角内刺激人眼的条纹的周期数目,计算如式(2)^[10],单位为 cpd(cycle per degree)。

$$f_\theta = \frac{N}{\theta}, \quad (2)$$

式中, N 为 θ 范围内条纹的周期数目。

(2)色度 CSF_{rg}和 CSF_{by}

红绿 CSF_{rg}: $CSF_{rg}(f_{\theta}) = a \cdot \exp^{b(f_{\theta})^c}$, (3)

蓝黄 CSF_{by}: $CSF_{by}(f_{\theta}) = a \cdot \exp^{b(f_{\theta})^c}$, (4)

式中: a 、 b 和 c 为参数, 其值如表 1; CSF_{by} 和 CSF_{rg} 分别表示蓝黄和红绿对立色对比敏感阈值^[12]。

表 1 式(3)和(4)中的参数值

Tab.1 Three parameters in the equation (3) and (4)

Parameters	a	b	c
红绿 CSF _{rg}	1.000	-0.152	0.893
蓝黄 CSF _{by}	1.000	-0.2041	0.900

2.2 人眼觉察图像时的对比敏感度阈值计算方法

为了应用 CSF 于图像水印中, 需要构建角频率与频谱图中空间频率之间的关系, 从而计算人眼觉察图像时, 图像上每一点的角频率。具体方法描述如下。

图像经离散余弦变换(DCT, Discrete Cosine Transform)后, 频谱图上任意一点的频谱坐标(f_x, f_y)即为该点的空间频率。通过图像时空变换实验发现: 图像频域上的任何一点, 其逆变换(IDCT)呈现为水平或竖直或二者共有的条纹, 所有条纹表现为在视觉实验中的一个光栅, 其尺寸

等于原频谱图大小, 周期数目为 $(f_x^2 + f_y^2)^{1/2}$ 。由此表明, 当人观察图像时, 人眼感知的每一个点实质上是觉察其对应频率的条纹光栅。基于此实验结果, 代入式(2), 角频率与空间频率之间的转换可用式(5)描述。

$$f_{\theta} = \frac{N}{\theta} = \frac{\sqrt{f_x^2 + f_y^2} \times D \times \pi}{2 \times W \times \frac{2.54}{72} \times 180}, \quad (5)$$

式中: D 为观察距离, W 为观察图像局部范围的像素。

依据式(5), 计算图像中任意一点的角频率, 并代入 CSF 模型中, 则可获得图像中任意一点亮度和色度在人眼感知时的对比敏感阈值 CSF_L 、 CSF_{rg} 、 CSF_{by} 和觉察阈值。

3 彩色图像盲水印算法

3.1 水印嵌入算法

由于目前水印实际应用中受存储成本的限制, 且结合盲水印的特征, 数字水印多趋向于盲水印的研究。但盲水印嵌入容量相对较小, 鲁棒性比较差^[7-8], 若增大嵌入容量, 虽然鲁棒性较好, 但透明性较差, 影响原始图像。则需要重点研究嵌入容量与鲁棒性、透明性之间的平衡问题。根据以上思路, 水印嵌入方案如图 1。

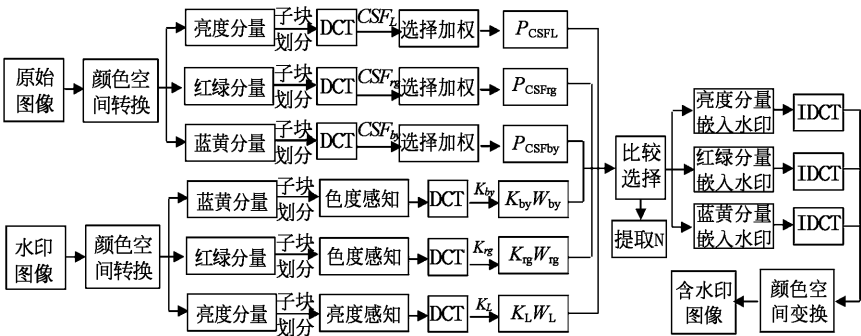


图 1 图像水印嵌入方案框架

Fig.1 Architecture for embedding watermark

具体的各个步骤说明如下:

(1) 将原彩色图像变换到 YCrCb 色空间, 得到亮度、红绿和蓝黄分量图; 对其进行 8 pixels×8 pixels 大小子块划分, 并对每个子块进行 DCT 变换; 选取其中低频成分的 10 个点, 选取方法如图

2; 依据以上方法计算每个选取点的角频率, 代入到 CSF 中, 分别计算出人眼亮度和色度对比敏感度阈值, 并将其归一化; 将归一化后的敏感阈值对应作为选取低频中的 10 个点的权重因子加权, 得到人眼感知原始图像中重要信息的对比敏感度阈

值,记为 P_{CSFL} 、 P_{CSFrg} 和 P_{CSFby} 。

1	2	4	7				
3	5	8					
6	9						
10							

图 2 频域子块中选取的 10 个点的示意图

Fig.2 Sketch of 10 points selected in frequency domain of sub-block

(2)对水印标识图进行亮度和色度分离,得到亮度、红绿和蓝黄分量图,并对其进行 $8 \text{ pixels} \times 8 \text{ pixels}$ 大小子块划分;对每一子块的每一点采用人眼强度感知模型(式 6)进行处理,并进行 DCT 变换,得到水印强度感知值,同样选取其中低频成分的 10 个点,记为 W_L 、 W_{rg} 和 W_{by} 。对每个值采用一个水印强度系数 K 加权,得到 $K_L W_L$ 、 $K_{rg} W_{rg}$ 、 $K_{by} W_{by}$ 。

$$W_i = \sum_{i=L,rg,by} k_i \log I_i, \quad (6)$$

(3)分别对应比较人眼对图像的敏感值 P_{CSFL} 、 P_{CSFrg} 、 P_{CSFby} 与加权后的水印强度感知值 $K_L W_L$ 、 $K_{rg} W_{rg}$ 、 $K_{by} W_{by}$, 当 $K_L W_L \leq P_{\text{CSFL}}$ 、

$K_{rg} W_{rg} \leq P_{\text{CSFrg}}$ 、 $K_{by} W_{by} \leq P_{\text{CSFby}}$ 时可以嵌入水印信息。考虑水印嵌入量的问题,将水印信息的子块与图像所有子块进行比较,取各自式中的等号且 K 值和最大时嵌入水印子块,则此时能够保证水印嵌入量最大;并得到水印嵌入强度系数值 K 和此时所嵌入图像所对应块的序数 N 。对所有水印子块一一实现以上操作,以 K 和 N 作为提取水印的密钥。

(4)对嵌入水印的三分量图各子块进行逆离散余弦变换(IDCT),并对其进行颜色空间变换,得到 RGB 色度图,即含水印图像,实现水印的嵌入。

3.2 水印提取算法

对含水印图实施逆过程处理,并按照密钥,提取水印信息。其中,提取水印时,对于给定的 K 和 N , N 定位于水印所在块的序数,并计算该子块的敏感值;然后除以 K 值,即可得到所要提取的水印信息。并且在其中,由于含水印图中每一点色度值的最大增加量是人眼感知原图像时的对比敏感度阈值(也等于加权后的水印强度感知值),其阈值一般比较小,则含水印图中每一点的值与未加入水印时非常接近;所以在此步骤中,含水印图的变换域中的任意一点值乘以 CSF 得到的该点的人眼对比敏感度阈值(记为 P_{WCSFL} 、 P_{WCSFrg} 和 P_{WCSFby})与 P_{CSFL} 、 P_{CSFrg} 和 P_{CSFby} 可以认为相等。则结合嵌入方法中步骤(3)中的关系可得到关系式(7)。基于此关系和密钥 K 的值,可得到嵌入的信息,即提取的水印信息,其计算如表达式(8)。

$$K_L W_L = P_{\text{CSFL}} = P_{\text{WCSFL}}, K_{rg} W_{rg} = P_{\text{CSFrg}} = P_{\text{WCSFrg}}, K_{by} W_{by} = P_{\text{CSFby}} = P_{\text{WCSFby}}, \quad (7)$$

$$W'_L = P_{\text{WCSFL}}/K_L, W'_{rg} = P_{\text{WCSFrg}}/K_{rg}, W'_{by} = P_{\text{WCSFby}}/K_{by}, \quad (8)$$

4 实验结果

为了验证上面提出水印算法的有效性,选取 $256 \text{ pixels} \times 256 \text{ pixels}$ 大小的 Lena 图为原始图像, $16 \text{ pixels} \times 16 \text{ pixels}$ 大小的 360 安全卫士的商标为水印图像进行仿真实验,实验结果如图 3。

水印技术中,一般采用主观和客观方法评价含水印图的质量(即透明性)和提取水印的效果。主观上直接觉察评价。客观上一般采用结构相似度 SSIM (Structural Similarity Index) 和峰值信

噪比 PSNR (Peak Signal to Noise Ratio) 来定量评价含水印图与原图的差异;SSIM 越接近于 1, 或 PSNR 越大,含水印图与原始图越接近。采用相似度归一化系数 NC (Normalized Coefficient) 值来评价提取水印与原水印之间的差异;NC 值越接近于 1,提取的水印与原水印越接近^[14]。

从图 3 可以直观发现:人眼几乎不能分辨出含水印图与原图之间的差异,提取的水印图与原水印图几乎一样;其效果较好地保证了水印的透明性和满足了图像水印的要求。从客观上,分别计算出含水印的彩色图、Y 分量图、Cr 分量图和 Cb 分量图与原始彩色图及对应分量图之间的



图 3 水印嵌入和提取实验结果. (a) ~ (d) 原始水印彩色图和三分量图, (e) ~ (h) 原始彩色图和三分量图, (i) ~ (l) 嵌入水印的彩色图和三分量图, (m) ~ (p) 提取的水印彩色图和三分量图.

Fig.3 Experimental results of embedding and extracting watermarking. (a) ~ (d) the original watermarking color image and its tricomponents, (e) ~ (h) the original color image and its tricomponents, (i) ~ (l) the color watermarked image and its tricomponents, (m) ~ (p) the extracted color watermarking and its tricomponents.

SSIM 值,以及从其中提取的水印与原始水印之间的 NC 值,计算结果如表 2. 结果表明,水印方案较好的保证了水印的透明性和可检测性. 综合主客观评价效果表明,提出的水印方案是可行的和有效的.

表 2 含水印图的 SSIM 值以及提取水印的 NC 值
Tab.2 SSIM evaluating the watermarked images and NC values of the extracted watermark

含水印图	彩色图	Y 分量图	Cr 分量	Cb 分量
SSIM	0.994 7	0.997 0	0.996 0	0.991 2
NC	0.991 4	0.992 3	0.990 2	0.991 7

5 攻击测试和讨论

水印技术研究中,衡量水印方案优劣的重要标准之一是水印的鲁棒性,即抗攻击性^[13-14]. 为了测试提出的水印算法的抗攻击性,对嵌入水印的图像进行不同程度的 JPEG 压缩、剪切、高斯噪声、中值滤波和旋转 5 种攻击测试,并从中提取水印信息;其中,压缩程度采用质量因子 QF (Quality Factor) 为 20%、40%、50%、60% 和 80% 的 5 种,剪切采用左上和中间各剪切 1/4 区域,高斯噪声强度为 0.01,中值滤波采用[3 3]模板,旋转采用 45°和 90°两种. 其实验结果如图 4、

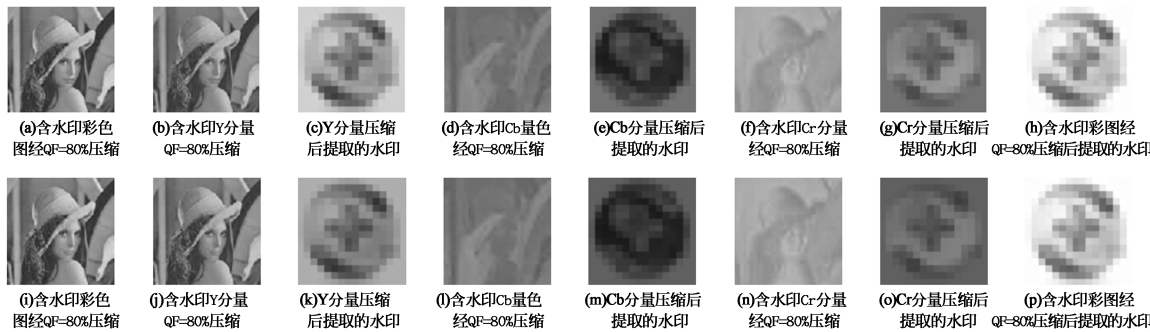


图 4 压缩攻击后的含水印彩色图和三分量图以及提取的水印信息图. (a) ~ (h) QF 为 80% 的压缩攻击测试结果, (i) ~ (p) QF 为 50% 的压缩结果测试攻击

Fig.4 Color and tri-component watermarked images attacked by compression and watermarking extracted from them. (a) ~ (h) the tested results from compression attacking of QF = 80%, (i) ~ (p) the tested results from compression attacking of QF = 50%

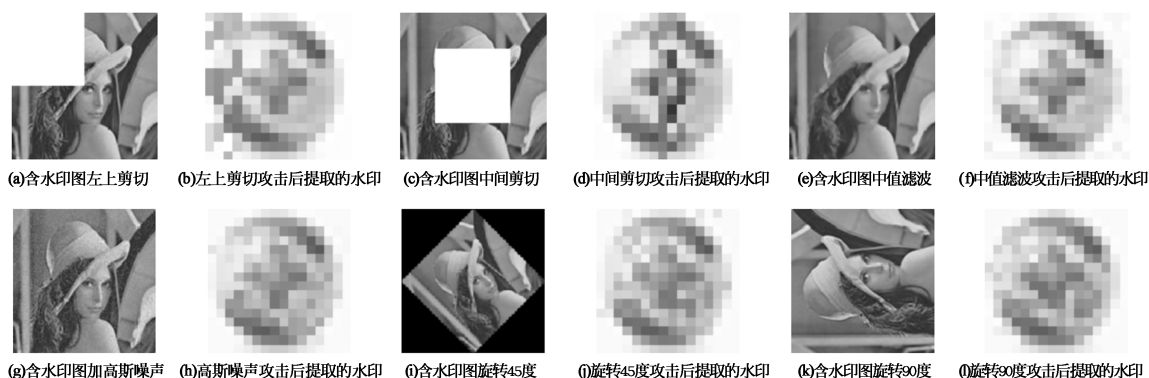


图5 4种类型攻击后的含水印彩色图和提取的水印信息图。(a)~(d)剪切,(e)~(f)中值滤波,(g)~(h)高斯噪声,(i)~(l)旋转。

Fig.5 Color watermarked image attacked by 4 types and watermarking extracted from them. (a)~(d) cutting, (e)~(f) median filter, (g)~(h) Gaussnoise, (i)~(l) rotation.

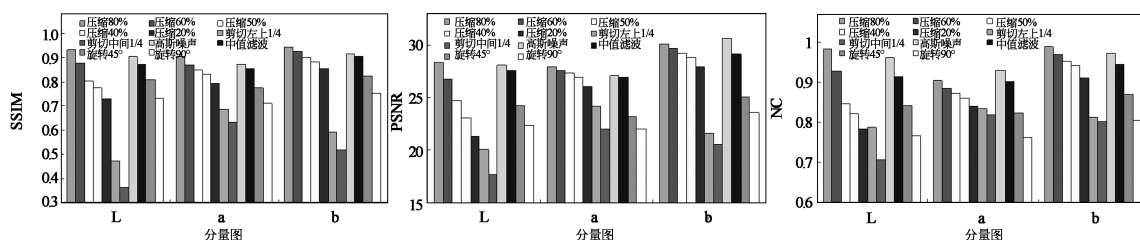


图6 含水印图经5种类型攻击后的SSIM、PSNR值和提取的水印的NC值。(a) SSIM, (b) PSNR, (c) NC。

Fig.6 SSIM and PSNR of the watermarked image attacked by 5 types and NC of the extracted watermarking from them. (a) SSIM, (b) PSNR, (c) NC.

图5和图6。其中,图4是QF为80%和50%的压缩攻击测试实验结果,图5是其余4种攻击测试实验结果。计算含水印图在5种攻击后的图像与原图像之间的SSIM和PSNR值,并计算从中提取的水印与原始水印之间的归一化相似度NC值,且对不同攻击程度的水印实验结果做相互对比,结果如图6。

从图4、图5的主观感知和图6的计算结果表明:(1)主观上,虽然攻击后提取的水印信息有一定的损失,但仍清晰可见;客观评价上,在QF为20%、中间剪切1/4区域的较强攻击下,NC值仍能达到0.78,较好地保证了提取水印的有效性。(2)图6的计算结果表明:①中值滤波和高斯噪声攻击后提取水印的NC值均超过0.9,表明该算法具有较好的抗二者攻击性;②含水印图的亮度分量经过压缩攻击后提取的水印的NC值下降明显快于色度分量攻击后提取的水印的NC值,说明色度分量的抗压缩攻击性明显好于亮度分量;在剪切攻击中,从含水印色度分量图中提取的水印

的NC值比从亮度分量中提取水印的NC值下降相对较慢,同样表明,色度分量的抗剪切攻击性明显好于亮度分量。综合攻击测试结果说明:提出的水印方案是一种行之有效的水印嵌入和提取方案。

为了说明提出水印算法的优越性,将该算法与文献[1]、[14]、[15]和[16]中的4种水印算法的抗攻击性进行对比。文献中的4种算法依次为:基于DCT的自适应盲数字水印算法^[1]、改进的RGB颜色空间盲彩色图像水印算法^[14]、基于感兴趣区域的水印算法^[15]和基于人眼感知阈值的鲁棒性水印算法^[16]。其对比结果如图7。

对比分析图7的结果表明:(1)对于不同程度的5种攻击方式,文献中的4种算法的抗攻击性能各有优劣,但本文提出的水印算法,整体表现更好,其抗攻击性对多种攻击均表现为几种方法中的最好或次好。(2)对于压缩攻击,在攻击程度QF达到70%以下时,采用文中算法提取水印的NC值明显大于其它算法的值,表明本文的水印

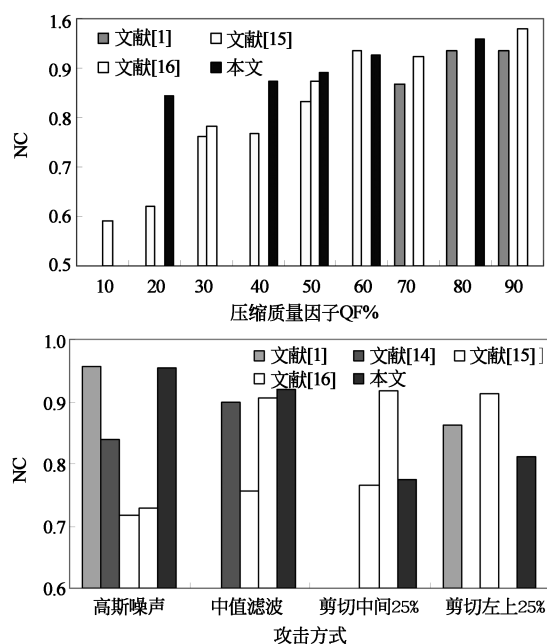


图 7 文献中的 4 种水印算法与文中的水印算法的抗攻击性能对比

Fig.7 Comparison of anti-attack performances of 4 watermarking algorithms in the references with the ones of the watermarking algorithms proposed in the paper

算法比其它 4 种算法具有更好的抗压缩攻击性能。综合对比结果表明,本文提出的水印算法具有较好鲁棒性。

6 结 论

针对水印透明性、抗攻击性与水印容量之间的平衡问题,结合人眼对比敏感度视觉特性,本文提出了一种彩色图像的盲水印算法。该算法首先结合视觉特性及其模型,计算人眼感知原始图像时的对比敏感度阈值,其次结合人眼对强度的感知模型,计算水印图像信息的强度感知值;然后结合嵌入强度系数值,以感知原始图像的对比敏感度阈值为水印嵌入量的门限,实现数字水印的嵌入;最后依据密钥,采用逆过程提取水印。实验结果表明,在压缩质量因子为 20%、中间剪切 1/4 区域的较强攻击下,提取水印与原水印的相似度能够达到 0.78,较好地保证了水印的透明性,说明提出的水印方案是一种行之有效的水印嵌入和提取方案。

参 考 文 献:

- [1] 周晓娟,孙建召.基于 DCT 的自适应盲数字水印[J].包装工程,2017,38(3):192-196.
ZHOU X J, SUN J Z. Self-adaptive blind digital watermarking based on DCT [J]. *Packaging Engineering*, 2017, 38(3): 192-196. (in Chinese)
- [2] HORNG S J, ROSIYADI D, FAN P Z, *et al.* An adaptive watermarking scheme for e-government document images [J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2014, 72(3): 3085-3103.
- [3] DAS C, PANIGRAHI S, SHARMA V K, *et al.* A novel blind robust image watermarking in DCT domain using inter-block coefficient correlation [J]. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 2014, 68(3): 244-253.
- [4] 柯洪昌,孙宏彬.图像序列的显著性目标区域检测方法[J].中国光学,2015,8(5):768-774.
KE H C, SUN H B. A saliency target area detection method of image sequence [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(5): 768-774. (in Chinese)
- [5] 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 J. Digital image watermarking technology based on human vision characteristics [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2011, 26(2): 234-240. (in Chinese)
- [6] 白韬韬,刘真,卢鹏.基于计算全息的全鲁棒性自适应水印算法[J].液晶与显示,2015,30(1):170-179.
BAI T T, LIU Z, LU P. Adaptive watermarking algorithm based on CGH with strong robustness [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2015, 30(1): 170-179. (in Chinese)
- [7] AKHAEI M A, SAHRAEIAN S M E, JIN C. Blind image watermarking using a sample projection approach [J]. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2011, 6(3): 883-893.
- [8] BENORAIIRA A, BENMAHAMMED K, BOUCENNA N. Blind image watermarking technique based on differen-

- tial embedding in DWT and DCT domains [J]. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2015, 2015(1): 55.
- [9] MAKBOL N M, KHOO B E, RASSEM T H. Block-based discrete wavelet transform-singular valuedecomposition image watermarking scheme using human visual system characteristics [J]. *IET Image Processing*, 2016, 10(1): 34-52.
- [10] BARTEN P G J. Evaluation of subjective image quality with the square-root integral method [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1990, 7(10): 2024-2031.
- [11] NADENAU M. Integration of human color vision models into high quality image compression [D]. Lausanne, Switzerland: École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2000.
- [12] YAO J C. Measurements of human vision contrast sensitivity to opposite colors using a cathode ray tube display [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(23): 2425-2432.
- [13] WANG Z Y, LI L Y, WU S, *et al.* A new image quality assessment algorithm based on SSIM and multiple regressions [J]. *International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition*, 2015, 8(11): 221-230.
- [14] JESWANI J, SARODE T. An improved blind color image watermarking using DCT in RGB color space [J]. *International Journal of Computer Applications*, 2014, 92(14): 50-56.
- [15] 马巧斌. 基于感兴趣区域数字水印嵌入算法的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013.
MA Q E. Research of the digital image atermarking algorithm based on region of interest [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2013. (in Chinese)
- [16] ERNAWAN F. Robust image watermarking based on psychovisual threshold [J]. *Journal of ICT Research and Applications*, 2016, 10(3): 228-242.

作者简介:姚军财(1979—),男,湖北黄冈人,硕士,副教授,主要从事视觉光学和多媒体信号处理与通信方面的研究。E-mail: yjc4782@163.com