

基于视觉显著性与量化指数调制的 图像鲁棒水印算法*

钟瑞泽¹ 谢海波²

(1.广州美术学院 广州 510260; 2.华南师范大学 广州 510631)

摘要:为了兼顾水印系统的透明性与抗几何变换能力,提出了基于视觉显著性与量化指数调制的图像鲁棒水印算法。首先,采用 Ripplet 变换来处理宿主图像,得到特征映射;再利用 Gaussian 概率密度模型来计算特征映射对应的视觉显著性映射,并将其实施分解成一系列的子块,以获取其显著性均值;引入非下采样 Contourlet 变换来分解宿主图像,输出对应的低通子带和带通方向子带;随后,把低通子带分割为尺寸较小的非重叠子块,并计算每个子块的能量;联合显著性均值与能量,计算待嵌入子块对应的量化步长,将其视为密钥;借助奇异值分解来处理低通子带的每个子块,获取对应的对角矩阵,基于这些矩阵中的最大元素的均值,通过改进传统的对数量化指数调制方法,设计水印嵌入方法,根据每个子块对应的量化步长,将水印数据隐藏到载体中,得到水印图像;最后,根据接收密钥,定义水印提取机制,在水印图像中检测水印数据。实验数据表明:较当前的基于分块的水印技术而言,所提算法具备更高的水印透明性,且在常规几何内容操作下,其表现出更强的鲁棒性,所复原的水印失真最小。

关键词: 图像水印;显著性映射;量化指数调制;非下采样 Contourlet 变换;量化步长;奇异值分解;子块能量

中图分类号: TP391;TN0 **文献标识码:**A **国家标准学科分类代码:** 520.6040

Robust image watermarking algorithm based on visual saliency and quantization exponential modulation

Zhong Ruize¹ Xie Haibo²

(1.Guangzhou Academy of Fine Arts, Guangzhou 510260, China;2.South China Normal University, Guangzhou 510631, China)

Abstract: In order to take into account the transparency and anti-geometric transformation ability of the watermarking system, a robust image watermarking algorithm based on visual saliency and quantization index modulation is proposed in this paper. Firstly, the Ripplet transform is used to process the host image for getting the feature map. Then, the Gaussian probability density model is used to calculate the visual saliency mapping corresponding to the feature map, and divide it into a series of non-overlapping sub-blocks for calculating the saliency mean of each sub-block. The non-down sampling Contourlet transform is introduced to decompose the host image for outputting the corresponding low-pass subbands and band-pass directional subbands. Subsequently, the low pass subband is divided into smaller non-overlapping subbands and the energy of each subband is calculated. The saliency mean and energy are jointed to calculate the quantization step corresponding to the embedded sub-block, which treat it as a key. The singular value decomposition is used to process each sub-block of low pass subband for obtaining the corresponding diagonal matrix, and the maximum singular value is found out. A watermarking embedding method is designed based on the mean of the maximum singular value corresponding to all sub-blocks, and according to the quantization step corresponding to each sub-block, the watermarking data is hidden into the carrier to get the watermarking image. Finally, according to the received key, the watermarking extraction mechanism is defined to detect the watermarking data in the watermarking image. The experimental data show that this algorithm has higher transparency than the current block-based watermarking technology, and under the conventional geometric content operation, it shows stronger robustness, and the restoration of watermarking distortion is the smallest.

Keywords: image watermarking; saliency map; quantization exponential modulation; non-down sampling transform; quantization step; singular value decomposition; sub-block energy

0 引言

图像,作为当前各领域用户常用的交流载体,在教学、医学和红外等行业具有较大的实际应用意义^[1-2]。但是,市场上有许多先进的多媒体编辑工具,使其可以肆意修改图像,导致用户难以全面区分差异,给图像的所有权或真实性的判断带来较大的难度^[3]。这急剧增加了对保护图像内容真实性的强烈需求^[2-3]。而水印技术是一种保护图像信息安全的常用有效方法^[4-5]。当前的较为主流的水印技术分为 3 类:基于特征点的水印技术^[5]、基于变换域的水印技术^[6]以及同步校正方法^[7]。

基于特征点的水印技术主要是通过检测宿主图像中的稳定特征点来建立特征区域,以此来实现水印嵌入,张森等^[5]提出了基于概率密度梯度值估计与圆谐傅里叶变换的鲁棒图像水印算法,利用改进的 Harris-Laplace 方法来识别宿主图像的关键点,通过计算这些关键点的特征尺度来构建圆形局部特征区域,并引入圆谐傅里叶变换来得到这些区域的分解系数,并基于鲁棒系数选择规则来确定最佳的嵌入位置,最后,根据水印嵌入方法,把水印比特融入到宿主目标中的指定位置,得到水印图像,仿真结果显示了其算法具有优异的抗几何攻击能力。该技术是典型的基于特征点的水印技术,其表现出较强的鲁棒性,但这种方法在水印数据隐藏过程中,是采用较大的量化步长,削弱了水印透明性。

为了解决基于特征点的水印技术存在的缺陷,Fang 等^[6]提出了一种基于变换域的水印技术,首先将宿主图像分割为相同尺寸的非重叠子块,并利用 Gabor 滤波来估算每个子块的纹理方向,同时,利用离散余弦变换(discrete cosine transform, DCT)变换来分解子块,得到对应的 DCT 系数,在根据方向-系数映射,设计水印嵌入方法,将水印位沿着子块的纹理方向嵌入到宿主图像中,得到水印图像。该方案是一种典型的变换域技术,但是,该方案是把水印数据嵌入到所有的 DCT 系数中,使其对宿主图像的修改程度较大,且对于所有的子块,都是采用同一个较大的嵌入因子,使其不可感知有待提高,难以较好地兼顾鲁棒性与水印隐秘性。为了解决该问题,Wang 等^[7]设计了同步校正水印方法,采用非下采样剪切波变换来分解宿主图像,输出高频与低频系数,通过水印嵌入方法,把水印数据植入到低频系数中,在水印复原过程中,利用支持向量机与极谱来构建同步校正机制,准确预测常规几何变换的参数,从而实现攻击水印图像的恢复,保证水印与宿主图像的视觉质量,测试结果表明了该方案具有理想的稳健性。虽然采用同步校正机制能够显著增强水印方案对各类常规几何变换的稳健性,但在水印嵌入期间,该技术的量化步长为一个经验值,没有考虑不

同系数之间的差异,导致其无法较好地平衡透明性与稳健性。

对于水印嵌入而言,取大的量化步长可以显著增强系统对几何攻击的稳健性,但其透明性会大幅下降,降低了图像的视觉质量,反之,较小的量化步长,能够提高水印透明性,但会削弱鲁棒性^[8]。对此,为了兼顾水印图像的透明性与抗几何变换能力,本文基于文献[8]的优化思想,提出了基于视觉显著性与量化指数调制的图像鲁棒水印算法。在主图像上分别进行显著目标检测和非下采样 Contourlet 轮廓变换,并将得到的低通子带划分成为不重叠的子块。通过计算子块对应的显著性均值与能量值来确定每个待嵌入子块对应的量化步长。利用奇异值分解(singular value decomposition, SVD)来分解每个低通子带的子块,从中确定出最大的奇异值,再联合最佳量化步长,基于改进的对数量化指数调制方法,将水印位嵌入到子块中,形成水印图像。最后,测试了所提水印算法的透明性与抗几何攻击能力。

1 本文鲁棒水印算法设计

本文基于视觉显著性与量化指数调制的图像鲁棒水印算法过程如图 1 所示。由图 1 发现,该方法可分为 5 个过程:1) 基于 Ripplet 变换的宿主图像显著性检测;2) 基于非下采样 Contourlet 变换(non-Sample contourlet transform, NSCT)的宿主图像分解;3) 量化步长的计算;4) 水印数据的嵌入(图 1(a));5) 水印检测(图 1(b))。通过利用视觉显著性映射的子块对应的显著性均值,和低通子带子块的能力来计算每个子块对应的量化步长,充分考虑了每个子块之间的差异,从而可以实现差异嵌入,更好地平衡抗几何攻击能力与透明性。

1.1 基于 Ripplet 变换的宿主图像显著性检测

Ripplet 变换^[9-10]能较为理想的描述图像的 2D 奇异点,通常被用于目标的多尺度空域与频域分析。令大小为 $N \times N$ 的宿主图像为 $f(n_1, n_2)$, 其对应的 Ripplet 变换如下^[10]:

$$C_{j,k,l} = \sum_{n_1=0}^{N-1} \sum_{n_2=0}^{N-1} f(n_1, n_2) \overline{\rho_{j,k,l}(n_1, n_2)} \quad (1)$$

式中: $C_{j,k,l}$ 是宿主目标 $f(n_1, n_2)$ 的 Ripplet 系数; j 是尺度参数; k 是方向参数; l 是旋转参数。

为了重构宿主图像,根据如下的离散 Ripplet 逆变换来实现:

$$f(n_1, n_2) = \sum_{n_1=0}^{N-1} \sum_{n_2=0}^{N-1} C_{j,k,l} \rho_{j,k,l}(n_1, n_2) \quad (2)$$

根据文献[11]可知, Ripplet 变换能够较为紧凑描述图像,提高其系数衰减速度,用更少的系数来表征图像内容。一般而言,利用式(1)来计算宿主图像的 Ripplet 系

NSDFB 则是把子带实施多方向分解,从而得到不同尺度的子带系数^[15-16]。

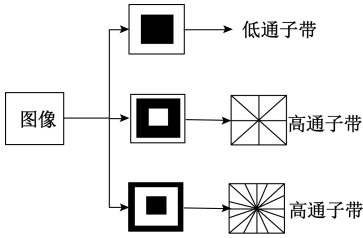


图3 非下采样 Contourlet 变换的过程

Fig.3 The process of nonsampling Contourlet transformation

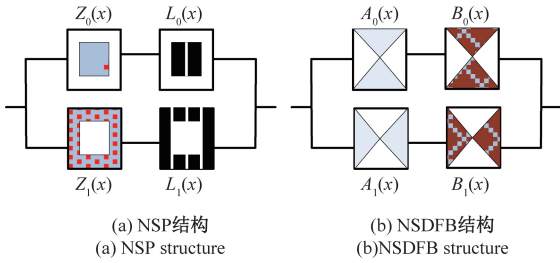


图4 NSP 与 NSDFB 结构示意图

Fig.4 The structure diagram of NSP and NSDFB

宿主图像 $f(x, y)$ 经过上述 m 级的 NSCT 变换后,得到 1 个低通子带和多个高通子带。取 $m=2$, 对图 2(a) 实施 2 级 NSCT 变换, 结果如图 5 所示。由图 5 发现, 左上角的低通子带包含了源宿主图像的绝大部分能量信息, 如图 5(a) 所示。随后, 对其实施处理, 将其变为若干个 $a \times a$ 的子块 $h_1, h_2, \dots, h_k$, 如图 5(b) 所示。

1.3 量化步长的计算

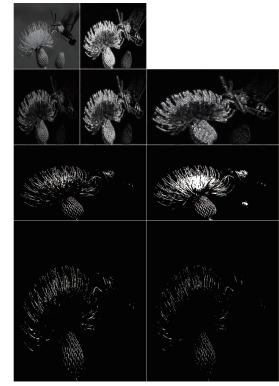
根据文献[8]可知, 量化步长对整个水印方法具有较大的影响。为此, 本文利用子块的显著性均值与能量分布来计算每个嵌入子块的量化步长, 充分考虑嵌入子块的特性来确定合适的步长, 以兼顾水印系统的透明性与稳健性。

一般而言, 显著性映射主要是由一系列的显著性值 $S \in [0, 255]$ 构成的, 其中, 显著性区域具有更高的 S 值^[17]。利用前文得到的显著性映射子块 $B_1, B_2, \dots, B_k$, $B_i, i \in [1, 2, \dots, k]$ 的平均显著性值 S' 来描述其视觉显著性的高低。 S' 值越大的子块, 表明其越容易吸引人眼, 因此, 考虑到水印的透明性, 该子块 B_i 的量化步长应取较小值。则此时的量化步长 Δ_s 计算函数如下:

$$\Delta_s = k_1 \times \frac{1}{S' + \delta} + b_1 \quad (6)$$

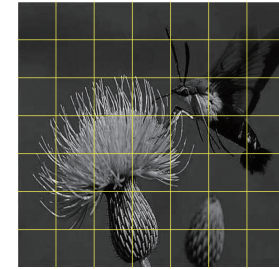
式中: $k_1 \in [0, 0.01]$ 是一个较小的权重系数; b_1 是基本量化步长; δ 是一个常量, 防止 $S' = 0$ 。

随后, 本文分析了图像子块的能量分布对量化步长



(a) 2级NSCT变换结果

(a) The result of two-level NSCT transform



(b) 低通子带分割结果

(b) Low-pass subband decomposition results

图5 二级 NSCT 变换的宿主图像分解

Fig.5 Host image decomposition of two-level NSCT transform

的影响。子块的能量越高, 则图像的掩蔽能力越强, 因此可以采用较大的量化步长来增强透明性。在所提算法中, 主要是计算低通子带的子块所含的能量。对于每个子块 h_i 而言, 本文通过计算低通子带系数的均值来描述 h_i 的能量 E , 则此时的量化步长 Δ_E 计算函数如下:

$$\Delta_E = k_2 \log_2 E + b_2 \quad (7)$$

式中: $k_2 \in [0, 0.0001]$ 是一个较小的权重系数; b_2 是基本量化步长。

在对显著性映射与低通子带进行划分子块时, 将二者分割数量相等的子块, 则联合式(6)和(7), 可得第 i 个子块的量化步长 Δ_i , 并把其当作复原水印的密钥:

$$\Delta_i = \Delta_{s_i} + \Delta_{E_i} = k_1 \times \frac{1}{S'_i + \delta} + b_1 + k_2 \log_2 E_i + b_2 \quad (8)$$

1.4 基于对数量化指数调制的水印嵌入

对数量化指数调制^[18]主要是在 u 法则^[18]的基础上引入对数函数来处理宿主信号, 通常, 对于宿主图像而言, 其信号的振幅更集中在零附近, 因此, 更多的步长应该用于量化较小的振幅, 而较小的步长应该与较大的振幅相关。所以, 对于不同的信号振幅, 都会产生一个更均匀的信号量化误差比, 从而最小化量化失真, 有效降低水印嵌入后引起宿主信号的变化程度。为了进行对数量

化,首先需要使用以下压缩函数来转换主信号 $x^{[18]}$:

$$c = \frac{\ln\left(1 + \mu \frac{|x|}{X}\right)}{\ln(1 + \mu)} \quad (9)$$

$\mu > 0, X > 0$

式中: c 是变换后的信号; μ 是压缩水平; $X \in [0, 1]$ 代表缩放宿主信号的参数。

随后,利用 c 对水印比特实施量化处理。并把量化后的信号按照可逆函数转换回原始域 $x_w^{[18]}$:

$$x_w = \text{sign}(x) \frac{X}{\mu} [(1 + \mu)^z - 1] \quad (10)$$

式中: x_w 代表原始域中的水印信号。

虽然对数量化指数调制对常规的几何攻击表现出较好的鲁棒性,但是其对幅度缩放非常敏感,为此,本文考虑基于子块的嵌入策略,对式(9)和(10)进行改进。由于水印图像受到幅度缩放攻击后,每个水印信号都是利用同一个缩放因子来乘以每个子块的水印信号。然后,可以通过除法将缩放因子进行拆分,并保持这个值在变换域中不变。因此,可以采用宿主信号均值的2倍来替代式(9)和(10)中的 X 。则式(9)和(10)分别转变为:

$$c = \frac{\ln\left(1 + \mu \frac{|x|}{2X'}\right)}{\ln(1 + \mu)}, \mu > 0 \quad (11)$$

$$x_w = \text{sign}(x) \frac{2X'}{\mu} [(1 + \mu)^z - 1] \quad (12)$$

式中: X' 代表每个子块对应的宿主信号的均值。

依据式(11)和(12),则水印嵌入过程如下。

1) 基于SVD^[19]处理低通子带的每个大小为 $a \times a$ 的子块 h_i :

$$L_i = U_i Z_i A_i^T \quad (13)$$

式中: U_i 和 A_i 均为第 i 个子块的正交矩阵; Z_i 是含有若干个奇异值的对角矩阵; $L_i = U_i Z_i A_i^T$ 是第 i 个子块的SVD分解式。

通过式(13)可得低通子带中的第 i 个子块对应的所有奇异值,记为 $\text{dig}(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \dots, \sigma_a)$,并找出最大的元素值 $\sigma_{\max}$ 。

2) 计算所有子块对应的 $\sigma_{\max}$ 的均值,记为 σ' ;

3) 根据式(11)和(12),结合宿主图像子块的量化步长 Δ_i ,设计如下水印嵌入方法:

$$c = \frac{\ln\left(1 + \mu \frac{|\sigma_{\max}|}{2\sigma'}\right)}{\ln(1 + \mu)} \quad (14)$$

$$c^q = Q_{bi}(c, \Delta_i) = \lfloor \frac{c + b_i \Delta_i}{2\Delta_i} \times 2\Delta_i + b_i \Delta_i \rfloor \quad (15)$$

$$\sigma_{\max(i)}^q = \text{sign}(\sigma_{\max(i)}) \frac{2\sigma'}{\mu} [(1 + \mu)^{c^q} - 1] \quad (16)$$

式中: μ 是压缩水平; $b_i \in [0, 1]$ 代表水印比特; $\sigma_{\max(i)}^q$ 是嵌入水印后的最大奇异值。

根据式(14)~(16)发现,所设计的水印嵌入方法主要采用将水印比特融入到奇异值中,而奇异值可以较好地反映图像的内在特征,良好的稳定性^[19],在几何攻击下不会发生很大的变化。另外,式(16)主要是根据水印比特来选择不同的量化步长 Δ_i ,充分考虑了不同子块的特性。从而使得所提水印算法可以较好地平衡鲁棒性与水印透明性。

4) 再利用步骤3)得到的 $\sigma_{\max(i)}^q$ 来替换初始的第 i 个子块的 $\sigma_{\max(i)}$,从而得到水印奇异值矩阵 Z_i^q 。再通过式(13),联合初始的正交矩阵 U_i 和 A_i ,即可得到嵌入水印后的第 i 个子块对应的低通子带 L_i^q 。

5) 组合所有嵌入水印后的低通子带 L_i^q ,借助可逆NSCT变换,输出水印图像 I' 。

以图6(a)所示为水印数据,显著性映射子块的尺寸设置为 16×16 ,利用二级NSCT变换得到的低通子带的子块大小为 4×4 ,则通过上述方法,将其嵌入到图2(a)中,形成的水印图像如图6(b)所示。由图6发现,输出的图像与宿主图像几乎无差别,看不到任何有关的水印信息,呈现出理想的透明性。

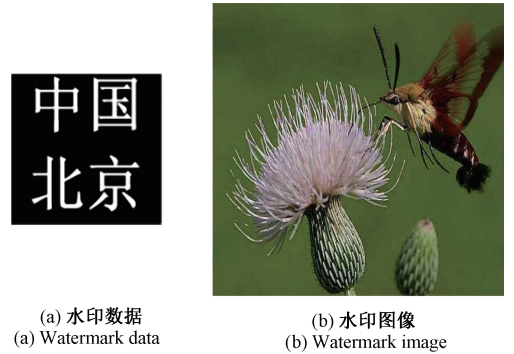


图6 水印嵌入结果

Fig.6 Watermark embedding results

1.5 水印检测

1) 利用NSCT来分解水印图像 I' ,得到低通子带,并将其分解成 $a \times a$ 的子块 $h'_1, h'_2, \dots, h'_k$ 。

2) 基于式(13)来处理子块 h'_i ,得到第 i 个子块对应的所有奇异值,记为 $\text{dig}(\sigma'_1, \sigma'_2, \sigma'_3, \dots, \sigma'_a)$,并从中找出最大的元素值 $\sigma'_{\max}$ 。

3) 用户接收密钥,从而得到第 i 个宿主图像子块的量化步长 Δ_i 。

4) 计算所有子块对应的 $\sigma'_{\max}$ 的均值,记为 σ'' 。

5) 根据如下方法来提取水印 b'_i :

$$c' = \frac{\ln\left(1 + \mu \frac{|\sigma'_{\max}|}{2\sigma''}\right)}{\ln(1 + \mu)} \tag{17}$$

$$b'_i = \arg \min_{b'_i \in [0,1]} |c' - Q_{b'_i}(c', \Delta_i)| \tag{18}$$

式中： b'_i 是提取后的水印比特。

6) 利用步骤 2)~5) 来处理所有的子块, 将其得到的水印比特进行组合, 得到水印数据。

以图 6(b) 为对象, 根据上述过程, 从中提取水印, 结果如图 7 所示。由图 7 发现, 提取水印数据较为完整, 失真度较小。



图 7 水印提取结果
Fig.7 Watermark extraction results

2 测试结果与分析

采用 MATLAB 平台来测试所提算法的水印透明性与对几何内容变化的稳健性。与此同时, 为了突出其水印性能的优势, 将文献[6-7]作为对比组。实验条件是 DELL vostro 1088, 3 GHz, 双核 CPU, 1 TB 固态硬盘、8 GB RAM。考虑一般性, 在 USC-SIPI 图像库^[20]中随意挑选 2 幅标准图像作为宿主图像, 如图 8(a)、(b) 所示; 待嵌入的水印数据如图 8(c)、(d) 所示。所选择的标准宿主图像尺寸是 512×512、NSCT 变化的分解级数为 3、显著性映射子块和低通子带子块大小分别为 16×16 与 2×2。水印性能的评价对象为: 透明性、鲁棒性和 ROC 曲线。

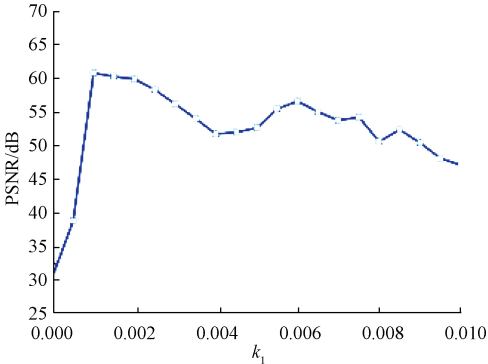


图 8 宿主图像与水印数据
Fig.8 Host image and watermark data

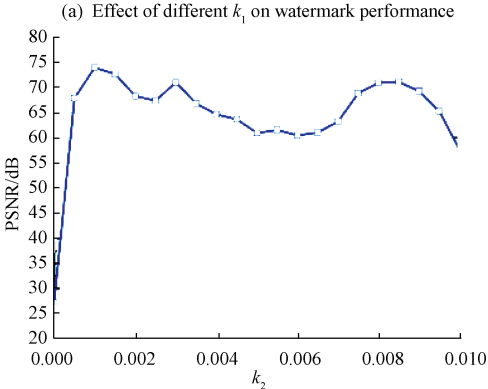
2.1 参数的优化选择

根据本文所提水印算法的过程可知, 两个权重系数

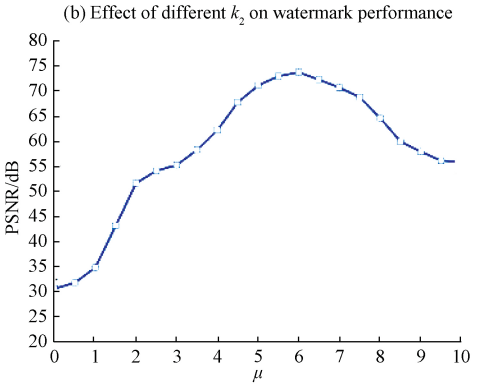
k_1 和 k_2 对量化步长影响较大, 且压缩因子 u 直接影响了水印效果。为了研究这些参数对水印性能的影响, 本文对这 3 个参数进行了实验分析, 以确定最佳的参数。首先, 在 USC-SIPI 图像库^[20]中随机选择 10 图像, 并自行构建 10 个水印内容, 按照所提算法的过程进行嵌入, 得到 10 幅对应的水印图像, 通过计算这些结果的平均峰值信噪比 (peak signal-to-noise ratio, PSNR)^[3] 来评估效果, 以确定最佳参数。在此次实验中, 采用单次参数设置定量的方法来进行, 首先, 取 10 个不同的 k_1 值, 固定 k_2 和压缩因子 u , 根据这些参数进行实验, 得到的 PSNR 均值如



(a) 不同的 k_1 对水印性能的影响



(b) 不同的 k_2 对水印性能的影响



(c) 不同的 u 对水印性能的影响

(c) Effect of different u on watermark performance

图 9 关键参数对水印性能的影响测试

Fig.9 Test of the influence of key parameters on watermark performance

图9(a)所示。由图9(a)发现,当 $k_1=0.001$ 时,对应的 $PSNR$ 值最大。同样,10个不同的 k_2 值,取 $k_1=0.001$,固定 u 值,输出的结果如图9(b)所示。由图9(b)发现,当 $k_2=0.0001$ 时,得到的 $PSNR$ 值最大。最后,固定取 $k_1=0.001$ 和 $k_2=0.0001$ 时,设置10个不同的压缩因子 u ,根据这些参数进行测试,结果如图9(c)所示。由图9(c)发现,当压缩因子 $u=6$ 时,其对应的 $PSNR$ 值最大。综上所述,为了得到较好的水印性能,取 $k_1=0.001$ 、 $k_2=0.0001$,以及 $u=6$ 进行后续试验。



图10 三者算法的水印效果测试

Fig.10 Watermark effect test of three algorithms

为了客观评价三者水印方案的透明性高低,本文以图10(a)、(c)~(e)为目标,通过统计其直方图、像素分布概率曲线来体现三者的性能优劣差异,结果分别如图11、12所示。根据直方图结果发现,相对于源宿主图像而言,所提算法的水印图像与初始直方图之间的差异很小,较好地保持了源宿主图像的特性,如图11(b)所示。而文献[6-7]两种方案得到的直方图与宿主图像之间的差异较大,分别如图11(c)和(d)所示。另外,从图12也可发现,所提算法的水印图像,其灰度分布与宿主图像的拟合度非常大,如图12(a)所示,而文献[6-7]两种分布曲线不理想,不仅拟合度不高,而且还存有“越阶效应”,分布如图12(b)和(c)所示。原因是本文方案采用了奇异值分解来处理低通子带,并选择奇异值最大的子块作为水印比特嵌入位置,对宿主内容的修改非常小,而且采用宿主图像的显著性映射与能量分布来计算每个子块的量化步长,以此来完成水印嵌入,从而可以有效避免人眼视觉注意和增强水印的掩蔽能量,使其透明性最好。文献[6]主要是利用方向-系数映射来设计水印嵌入方法,

2.2 水印透明性测试

利用本文算法、文献[6-7]的水印方案,将图8(c)、(d)分别嵌入到图8(a)、(b)中,输出的水印效果如图10所示。由嵌入结果发现,3种水印方案都具有较好地透明性,三者均只呈现出宿主目标的内容,看不到任何的水印信息,能够较好地避开非法访问者的视觉注意力。该实验结果验证了本文算法、文献[6-7]方案都具备较好的水印透明性。

2.3 鲁棒性测试

理想的水印算法不仅具有较高的透明性,而且对各种几何攻击应呈现出足够高的鲁棒性^[3]。故本次实验选择图10(h)~(j)为目标,将表1的内容操作作用于这三者。随后,借助所提方案、文献[6-7]的水印检测过程,从不同攻击类型的水印图像中来复原水印比特,并基于 $PSNR$ 和 NC (normalized coefficient)^[5]来合理评价,得到的数据如表2所示。通过对比表中数据发现,当水印图像经过表1的内容操作时,3种方法得到的水印比特与

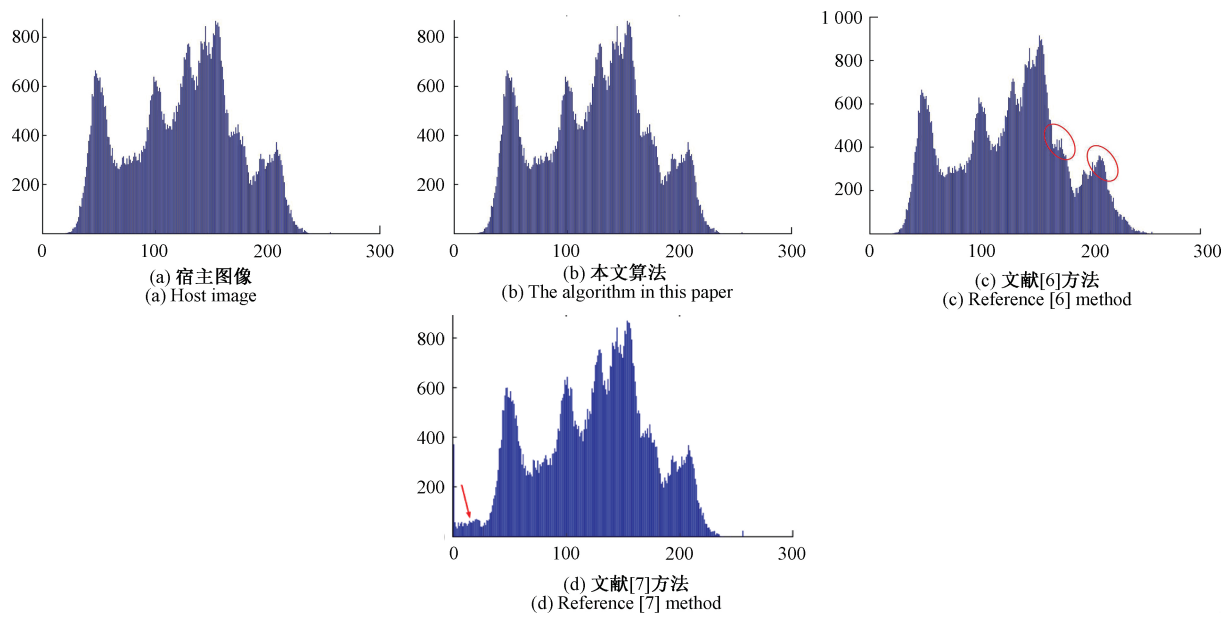


图 11 宿主图像与 3 种水印图像的直方图

Fig.11 Histogram of host image and three kinds of watermark image

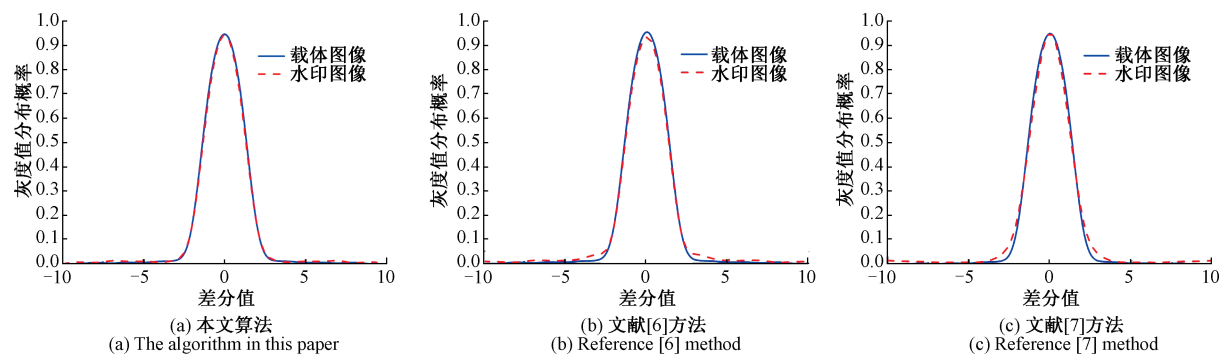


图 12 三种水印图像的灰度概率分布曲线

Fig.12 Gray probability distribution curves of three watermark images

源水印之间总是存在不同程度的失真,但是,从总体而言,文献[7]呈现出更强的鲁棒性,面对表中的几何攻击,其复原的水印比特失真最低,其 $PSNR$ 、 NC 值都是最高的。本文算法的鲁棒性虽然低于文献[7],但其复原的水印比特仍然具有较高的质量,失真度较小,对应的 $PSNR$ 、 NC 值也比较大。而文献[6]的方案在表中的几何攻击下所得到的水印比特失真度较大,其 $PSNR$ 、 NC 值都是最低的。原因是文献[7]采用了支持向量机与极谱来构建同步校正机制,在水印检测过程中,使其能够根据预测到的几何变换参数来校正水印图像,呈现出更强的鲁棒性。而所提算法则是采用宿主图像的显著性映射与能量分布来计算每个子块的量化步长,充分考虑了水印图像的鲁棒性,并基于所有子块对应的 SVD 均值与改进的对数量化指数调制来设计水印嵌入方法,充分利用了 SVD 的稳健性,使其对表中的几何内容操作也呈现出

较高的鲁棒性。文献[6]则是根据方向-系数映射所设计的水印嵌入方法,通过固定的量化步长,将水印比特沿着子块的纹理方向嵌入到宿主图像的 NSST 系数中,对几何攻击缺乏足够的鲁棒性。

表 1 攻击类型及其参数值

Table 1 Attack type and its parameter value

名称	旋转	尺度缩放	椒盐噪声	JPRG 压缩
参数值	45°	0.6	0.05	56

根据上述测试结果发现,虽然所提算法对几何内容攻击的鲁棒性要弱文献[7],但是也呈现出较高的稳健性,其 NC 值均大于 0.9,而且水印透明性要远优于文献[7]。而文献[6]算法则难以较好地兼顾透明性与鲁棒性,其检测水印的质量均低于文献[7]和所提算法,其 $PSNR$ 值均低于 40 dB。可见,所提算法具备更大的优势,水印性能要优于文献[6-7]。

表 2 不同方案的鲁棒性测试

Table 2 Robustness test of different schemes

名称	实验结果	旋转	缩放	椒盐噪声	JPRG 压缩
本文算法	PSNR/dB	43.02	43.54	43.97	39.51
	NC	0.976	0.981	0.988	0.922
	检测水印	东方明珠	东方明珠	东方明珠	东方明珠
文献[6]	PSNR/dB	36.14	37.03	35.56	33.29
	NC	0.853	0.915	0.863	0.796
	检测水印	东方明珠	东方明珠	东方明珠	东方明珠
文献[7]	PSNR(dB)	43.81	44.36	44.15	42.86
	NC	0.985	0.992	0.990	0.973
	检测水印	东方明珠	东方明珠	东方明珠	东方明珠

2.4 所提算法在电子凭证中的实际应用测试

水印方法在版权保护、证件票据防伪等实际领域具有重要应用价值^[5],为了验证所提方案在具体行业的效果,本文把电子发票当作样本,如图 13(a)所示,如果不把水印内容隐藏在发票中,很容易被非法分子进行伪造,给相关单位的财务造成混乱;所以,在此次试验中,把“中国税务”当作水印内容,如图 13(b)所示,通过所提算法,中其融入到图 13(a)中,形成的水印结果如图 13(c)所示。根据测试效果发现,水印内容较好地被融入到宿主图像中,具备理想的不可感知性,其与宿主图像之间的 PSNR 值高达 43.08 dB,核对人员仅需对图 13(c)的“中国税务”实施检测就能对发票的真伪作出决策。

为了测试所提算法的鲁棒性,对图 13(c)进行表 1 的几何内容操作,再借助其水印检测过程,得到各自对应的复原水印如表 3 所示。由表 3 发现,面对常规的内容变化,所提算法仍然可以得到完整的水印数据,且失真程度较低。这说明本文水印方案在电子凭证等实际领域中具有较好的应用价值。

表 3 不同几何内容变化下的水印提取质量测试

Table 3 Watermark extraction quality test under different geometric content changes

变换类型	检测水印	PSNR/dB	NC
旋转	中国税务	43.87	0.979
缩放	中国税务	44.53	0.987
椒盐噪声	中国税务	46.02	0.990
JPEG 压缩	中国税务	39.23	0.916



(a) 电子发票
(a) Electronic invoice



(b) 待嵌入的水印内容
(b) Watermark content to be embedded



(c) 水印结果
(c) Watermark result

图 13 本文算法在电子发票中的应用效果测试

Fig.13 The application effect test of the algorithm in electronic invoice

3 结 论

为了确定合适的量化步长,较好地平衡水印透明性与稳健性,本文提出了基于视觉显著性与量化指数调制的图像鲁棒水印算法。根据图像的显著性值和能量分布确定每个宿主图像子块的步长,以提高图像的水印透明性。联合 SVD 机制与改进的对数量化指数调制来设计水印嵌入方法,将水印比特嵌入到低通子带块的最大奇异值中,有效增强水印图像对几何内容的稳健性。为了评价所提方法的水印性能,测试了其透明性与鲁棒性,结果发现该算法不仅具有更优异的水印隐秘能力,而且对几何内容操作表现出较好地鲁棒性,所复原的水印质量较为理想,其 NC 值均大于 0.9。

参考文献

- [1] MEHRAN D A, MAJID M, ALI A. HVS-based scalable image watermarking [J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2019, 78(6): 7097-7124.
- [2] CHANG T J, PAN I, HUANG P S. A robust DCT-2DLDA watermark for color images[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2019, 78(7): 9169-9191.
- [3] 杨建新, 王中叶, 李威. 基于方向金字塔分解与稳定几何失真校正的鲁棒图像水印算法[J]. *包装工程*, 2019, 40(1): 206-218.
YANG J X, WANG ZH Y, LI W. A robust image watermarking algorithm based on directional pyramid decomposition and stable geometric distortion correction[J]. *Packaging Engineering*, 2019, 40(1): 206-218.
- [4] XU H C, KANG X B, CHEN Y J. Rotation and scale invariant image watermarking based on polar harmonic transforms[J]. *Optik*, 2019, 183(7): 401-414.
- [5] 张森, 曹再辉, 施进发. 基于概率密度梯度值估计与圆谐傅里叶变换的鲁棒图像水印算法[J]. *电子测量与仪器学报*, 2018, 32(10): 126-137.
ZHANG S, CAO Z H, SHI J F. robust image watermarking algorithm based on probability density gradient estimation and circular harmonic Fourier transform [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2018, 32(10): 126-137.
- [6] FANG H, ZHOU H, MA Z H. A robust image watermarking scheme in DCT domain based on adaptive texture direction quantization [J]. *Multimedia Tools & Applications*, 2019, 78(7): 8075-8089.
- [7] WANG X Y, XU H, ZHANG S Y. A color image watermarking approach based on synchronization correction[J]. *Fundation Informaticae*, 2018, 158(4): 385-407.
- [8] 朱光, 张军亮. 基于 SVD 和小波包分解的自适应鲁棒水印算法 [J]. *计算机应用研究*, 2013, 30(4): 1230-123.
- [9] ZHU G, ZHANG J L. Adaptive robust watermarking algorithm based on SVD and wavelet packet decomposition [J]. *Computer Application Research*, 2013, 30(4): 1230-123.
- [10] GENG P, HUANG M, LIU S Q. Multifocus image fusion method of ripple transform based on cycle spinning [J]. *Multimedia Tools & Applications*, 2016, 75(17): 10583-10593.
- [11] 冯鑫, 王小明, 党建武. 一种改进的基于 Ripple 变换的多聚焦图像融合方法 [J]. *光电子·激光*, 2013, 24(6): 1204-1210.
FENG X, WANG X M, DANG J W. An improved multifocus image fusion method based on ripple transform[J]. *Optoelectronics and Laser*, 2013, 24(6): 1204-1210.
- [12] ANDRUSHIA A D, THANGARAJAN R. An efficient visual saliency detection model based on ripple transform [J]. *Sādhanā*, 2017, 42(5): 671-685.
- [13] 杜婷, 李浩, 周绍光. 基于结构张量的前后向扩散图像去噪方法 [J]. *地理空间信息*, 2017, 15(9): 90-92.
DU T, LI H, ZHOU SH G. Denoising method of forward and backward diffusion image based on structure tensor[J]. *Geospatial Information*, 2017, 15(9): 90-92.
- [14] IMAMOGLU N, LIN W S, FANG Y M. A saliency detection model using low-level features based on wavelet transform [J]. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2013, 15(1): 96-105.
- [15] GLODEK M, SCHELS M, SCHWENKER F. Ensemble gaussian mixture models for probability density estimation [J]. *Computational Statistics*, 2013, 28(SI): 127-138.
- [16] 刘炜. 基于多尺度分析的图像融合算法研究 [D]. 杭州: 浙江工商大学, 2017: 23-33.
LIU W. Research on image fusion algorithm based on multi-scale analysis [J]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2017: 23-33.
- [17] 李建军, 张福泉. 非下采样 Conturlet 变换耦合锐度制约的遥感图像融合 [J]. *西南师范大学学报(自然科学版)*, 2019, 44(2): 102-110.
- [18] LI J J, ZHANG F Q. remote sensing image fusion

restricted by coupling sharpness of nonsampling contourlet transform [J]. Journal of Southwest Normal University (Natural Science Edition), 2019, 44(2): 102-110.

- [17] ZHANG J, DAI J, LU H C. A Bi-directional message passing model for salient object detection [C]. Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2018: 1741-1750.
- [18] WANG X K, WANG P J, ZHANG P. A blind audio watermarking algorithm by logarithmic quantization index modulation [J]. Multimedia Tools and Applications, 2014, 71(3): 1157-1177.
- [19] KANHE A, GNANASEKARAN A. Robust image-in-audio watermarking technique based on DCT-SVD transform [J]. EURASIP Journal on Audio Speech & Music Processing, 2018, 33(1): 1-13.
- [20] BIRAJDAR G. Blind method for rescaling detection and rescale factor estimation in digital images using periodic properties of interpolation [J]. AEU: International Journal of Electronics and Communications, 2015, 68(7): 644-652.

作者简介



钟瑞泽, 2001 年于华南师范大学获得学士学位, 2007 年于中山大学获得硕士学位, 现为广州美术学院讲师, 主要研究方向为多媒体技术、图形图像处理、计算机应用。
E-mail: ZhongRuiz1978gd@163.com

Zhong Ruizhe received B.Sc. degree from South China Normal University in 2001, and M.Sc. degree from Sun Yat-sen University. Now he is a lecturer at Guangzhou Academy of Fine Arts. His main research interests include multimedia technology, computer graphics & image processing and computer applications.



谢海波, 分别在 2001 年、2007 年和 2013 年于华南师范大学获得学士学位, 硕士学位和博士学位, 现为华南师范大学副研究员, 主要研究方向为计算机图像、教育技术、网络与信息技术。

E-mail: xiehbo1978hsd@tom.com

Xie Haibo received B.Sc., M.Sc. and Ph.D. from South China Normal University in 2001, 2007 and 2013, respectively. Now he is an associate professor at South China Normal University. His main research interests include computer image, education technology, network and information technology.