

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.06.008

SVD 与 HVS 相结合的小波域数字图像鲁棒水印*

任克强 梁亮亮 喻玲娟

(江西理工大学 信息工程学院 赣州 341000)

摘要:为了提升水印鲁棒性,解决水印透明性与鲁棒性相互间的矛盾,提出一种融合 SVD 和 HVS 优良特性的小波域数字图像水印算法。该算法首先对载体图像进行二级 DWT,提取二级低频子带并进行分块;然后对各个子块进行 SVD,根据 HVS 对平均亮度的敏感性,结合修正的余弦相似性度量方法计算出水印的最佳嵌入位置;最后以量化的方式将 Arnold 扰乱加密的水印嵌入到选定的奇异值中,嵌入强度根据载体图像子块的奇异值自适应地调节。实验结果表明,该水印不仅具有很好的透明性,对噪声、滤波、剪切以及 JPEG 压缩等水印攻击也都呈现出较高的鲁棒性。

关键词: 数字图像水印;奇异值分解;人类视觉系统;离散小波变换;鲁棒性;透明性

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Robust digital image watermarking in wavelet domain based on SVD and HVS

Ren Keqiang Liang Liangliang Yu Lingjuan

(School of Information Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

Abstract: In order to improve the watermarking robustness and solve the contradiction between the transparency and robustness of the watermarking, a digital image watermarking algorithm in wavelet domain based on singular value decomposition (SVD) and human visual system (HVS) is proposed. Firstly, the carrier image is carried on two-level discrete wavelet transform (DWT), and its second level low frequency sub-band is divided into blocks. Then, each sub-block is carried on SVD, the modified cosine similarity measurement method is used to calculate the best watermarking embedding position according to HVS sensitivity to the average brightness. Finally, the encrypted watermarking is embedded into the selected singular values by the quantizing way, and the embedding strength is adaptively adjusted according to singular value of the carrier image sub-block. The experimental results show that the transparency of the watermarking is very good, and it has high robustness against noise, filtering, cropping, JPEG compression and so on.

Keywords: digital image watermarking; singular value decomposition; human visual system; discrete wavelet transform; robustness; transparency

1 引言

通信方式的快速发展使得数字化产品的交换与传播日臻便捷和简单,由此衍生的数字化产品安全问题越来越受关注。数字水印是破解数字化产品安全问题的有效技术,已成为国内外信息安全学者的研究热点^[1-2]。数字图像水印算法从实现上大体能够归为两种类别:空域算法和变换域算法。空域算法直接更改图像灰度来完成水

印嵌入,变换域算法则首先对载体图像作某种变换运算,如离散小波变换(discrete wavelet transform, DWT)或离散余弦变换(discrete cosine transform, DCT),之后再修改其所对应系数以嵌入水印。变换域算法相较于空域算法其鲁棒性往往更为优异^[3-4]。

嵌入水印实质上能够视作于强背景上叠加弱信号,如果强度适当,主观感觉上几乎无法甄别^[5]。数字水印技术近年来发展迅速,迄今已有大量不同算法,提高算法的鲁棒性和透明性是目前研究的重要方向^[6-7]。文

文献[8]结合多描述编码技术把编码加密后的水印信息嵌入至载体图像差值图作一级 DWT 运算之后所得的中频子带中,该算法鲁棒性较好,具有较强的抗噪声与抗裁剪攻击性能,但其透明性仍需提升。文献[9]将载体图像分块之后,根据两两不重叠相邻块之间的关系,按照预定阈值修改其相应 DCT 系数以嵌入水印信息,该算法透明性良好,抵御单一攻击及联合攻击时都具有较强的鲁棒性,但抗噪声攻击性能略有不足。文献[10]将 QR 码作为水印图像,对其进行双随机相位编码以及共轭对称延拓傅里叶计算全息加密后,把加密后的全息水印嵌入至载体图像作二级 DWT 运算之后所得对角线的中频子带中,该算法鲁棒性方面表现较好,可以用地抵御打印扫描攻击,但遭受普通攻击时所呈现出来的抵御能力相对而言并不是很突出。文献[11]将载体图像 DCT 后,对所得系数矩阵作 zigzag 扫描处理并分成 4 个大小相同的子块,然后再把水印图像的奇异值量化嵌入至各个子块的奇异值之中,其步长由遗传算法优化调整确定,该算法不仅获得了良好的透明性,对多种攻击均表现良好的鲁棒性。文献[12]对载体图像作 DWT 后,把所得低频子带进行分块奇异值分解(singular value decomposition, SVD),然后比较两两邻近子块所得最大奇异值大小,并从中提取特征水印序列,最后采取量化的形式把该水印嵌入至低频子带各个子块最大奇异值之中,该算法不但透明性很好,遭受各种攻击时其鲁棒性也较为优异。文献[13]把水印信息嵌入至载体图像进行分块处理之后再作 DCT 运算所得的 DC 系数中,提取时先将含水印图像作抗亮度与对比度调节矫正处理之后再对其进行提取,该算法能有效地抵御亮度以及对比度攻击,对其他常规图像处理攻击也呈现出较强的鲁棒性,但该方案提取时需要提供水印嵌入之前的 DC 系数。文献[14]首先对载体图像作三级 DWT,然后再把水印图像的奇异值嵌入至第三级低频子带分块 SVD 之后的奇异值中,嵌入强度由萤火虫算法优化后的多尺度因子调整确定,该算法透明性很好,对各种水印攻击也呈现出良好的鲁棒性,但该方案时间开销较大。

针对数字图像水印算法的鲁棒性和透明性问题,本文提出一种人类视觉系统(human visual system, HVS)与 SVD 相结合的小波域数字图像水印算法。算法利用 HVS 的掩蔽特性以及修正的余弦相似性度量方法,从载体图像 DWT 后低频子带的奇异值之中选择出水印的最佳嵌入位置,嵌入强度依照载体图像子块的奇异值自适应地动态调节,以均衡水印鲁棒性与透明性相互间矛盾。

2 理论基础

2.1 奇异值分解

数字图像从线性代数的视角能够被视作为一个以非

负实数所构造而成的矩阵。若矩阵 $A \in R^{M \times N}$ 表示一幅数字图像,其奇异值分解^[15]如下:

$$A = USV^T = U \begin{bmatrix} \lambda_1 & & & \\ & \ddots & & \\ & & \lambda_M & \\ & & & \end{bmatrix} V^T \quad (1)$$

式中: $U \in R^{M \times M}$ 和 $V \in R^{N \times N}$ 都是正交矩阵; $S \in R^{M \times N}$ 是一个对角矩阵,其对角线中数值满足 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \lambda_r \geq \lambda_{r+1} = \dots \lambda_M = 0$, r 代表矩阵 A 的秩,表征其中非 0 实数个数; $\lambda_i (i = 1, 2, \dots, M)$ 为矩阵 A 的奇异值。

奇异值分解运算之于数字图像,大致上可以被归纳为如下几种特性:

1) 奇异值不会因为图像遭受细微扰动而产生强烈改变,具备相当好的稳定性。

2) 奇异值所呈现的是图像固有特征,因而视觉效果受到干扰较为微小。

3) 图像历经奇异值分解运算以后,所得奇异值矩阵中首个对角元素能够表征其大部分亮度信息。

以水印的角度考虑,采取图像奇异值分解第一种特性,能够保证水印具备较为优异的鲁棒性;第二种特性兼顾水印的透明性;最后一种特性指明了奇异值选取形式的参照。考虑到水印鲁棒性与透明性之间均衡,本文选择对载体图像历经二级 DWT 之后所得低频子带作奇异值分解。

2.2 HVS 的掩蔽特性

对于一幅数字图像, HVS 可以视作一个低通滤波系统,图像中不同位置上呈现出的信息, HVS 具有不同的敏感度^[16]。依照灰度等级,可以把图像分割成为 3 个区间,即低灰度区、中等灰度区以及高灰度区。亮度掩蔽特性证实,对于像素自身的不同灰度, HVS 所表现出来的敏锐水平存在差异,对中等灰度区展现出的敏感度十分强烈,轻易就能察觉像素值有无变化;而对于高灰度区与低灰度区,其敏感度均以高比例、非线性的形式下降,很难发觉像素值有无变化。

图像历经 DWT 以后,很大一部分亮度信息汇集于所得低频子带。为了保证载体图像在视觉上不受影响,本文利用修正的余弦相似性度量方法,选择将水印信息嵌入到载体图像进行二级 DWT 之后所得低频子带中表征平均亮度较低的子块。

2.3 相似性度量

协同过滤推荐算法首先通过对用户喜好进行剖析,从全体集合中搜索与目标用户近似的用户,之后再归纳分析这些近似用户对某些项目的评分,形成目标用户对这些项目喜好级别的评估,产生用户所需各类资源的个性化推荐,解决了繁杂的用户需求与浩瀚数据之间的冲突^[17]。协同过滤推荐算法中关键一步是量度用户彼此

间的相似性,常用余弦相似性、相关相似性以及修正的余弦相似性进行度量。

1) 余弦相似性

设有一个项目集合,若用户 i 与 j 所产生评分能用矢量 \mathbf{i} 与 \mathbf{j} 来表征,则两者间余弦相似性为:

$$sim(i, j) = \cos(\mathbf{i}, \mathbf{j}) = \frac{\mathbf{i} \cdot \mathbf{j}}{\|\mathbf{i}\| \times \|\mathbf{j}\|} \quad (2)$$

2) 相关相似性

设有一个项目集合,用户 i 与 j 所产生平均评分分别为 \bar{R}_i 与 \bar{R}_j ,若两者共同评分集合为 I_{ij} ,且对于该集合中某个项目 c ,两者所产生评分分别为 $R_{i,c}$ 与 $R_{j,c}$,则两者间相关相似性为:

$$sim(i, j) = \frac{\sum_{c \in I_{ij}} (R_{i,c} - \bar{R}_i)(R_{j,c} - \bar{R}_j)}{\sqrt{\sum_{c \in I_{ij}} (R_{i,c} - \bar{R}_i)^2} \times \sqrt{\sum_{c \in I_{ij}} (R_{j,c} - \bar{R}_j)^2}} \quad (3)$$

3) 修正的余弦相似性

设有一个项目集合,用户 i 与 j 所产生评分的集合分别为 I_i 与 I_j ,所产生平均评分分别为 \bar{R}_i 与 \bar{R}_j ,若两者共同评分集合为 I_{ij} ,且对于该集合中某个项目 c ,两者所产生评分分别为 $R_{i,c}$ 与 $R_{j,c}$,则两者间修正的余弦相似性为:

$$sim(i, j) = \frac{\sum_{c \in I_{ij}} (R_{i,c} - \bar{R}_i)(R_{j,c} - \bar{R}_j)}{\sqrt{\sum_{c \in I_i} (R_{i,c} - \bar{R}_i)^2} \times \sqrt{\sum_{c \in I_j} (R_{j,c} - \bar{R}_j)^2}} \quad (4)$$

本文首先将图像奇异值矩阵中的每一行视作用户对 n 维空间所产生的某个评分矢量,然后利用人眼对平均亮度的低程度敏感特性,结合平均值与标准差的方法从矩阵中寻找平均亮度最低的一行作为目标行,再通过修正的余弦相似性度量矩阵中的每一行与目标行间的相近程度,找出与目标行最相近的前 m 行构成目标行的近邻集合作为水印嵌入行。

3 算法描述

3.1 水印预处理

在嵌入水印之前,本文采取 Arnold 变换对水印进行扰乱加密,以破坏水印中像素之间的相互关联,进而确保水印具备隐蔽性、安全性。对于 $N \times N$ 的数字图像,其二维 Arnold 变换如下:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 2 \end{pmatrix}^t \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \pmod{N} \quad (5)$$

式中: $x, y \in \{0, 1, \dots, N-1\}$; (x, y) 为变换前的像素坐标, (x', y') 为变换后与之对应的坐标; $\text{mod} N$ 表示模 N 运算; t 为变换次数。

对于已被扰乱加密的水印图像,若想进行恢复,需要对其作对应的反变换运算:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 & -1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}^t \begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} \pmod{N} \quad (6)$$

3.2 水印嵌入

本文首先对载体图像进行二级 DWT,提取出低频分量进行分块 SVD,然后选择在低频分量的奇异值中嵌入扰乱加密之后的水印,嵌入强度由载体图像子块的奇异值动态调整。水印嵌入流程如图 1 所示。

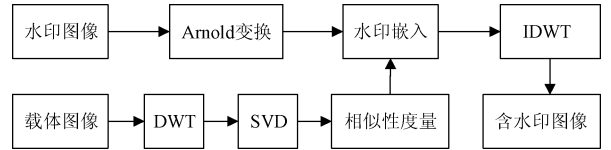


图 1 水印嵌入流程

Fig. 1 Flow chart of watermarking embedding

水印嵌入算法描述如下:

1) 通过 Arnold 变换对 $m \times n$ 的二值水印图像 W 扰乱处理,产生加密之后的二值水印 W_m 。

2) 对 $M \times N$ 的载体图像 I 作二级 DWT,获得低频分量 $CA_2(i, j)$ 、水平分量 $CH_2(i, j)$ 、垂直分量 $CV_2(i, j)$ 及高频分量 $CD_2(i, j)$, ($i \in [1, \frac{M}{4}]$, $j \in [1, \frac{N}{4}]$)。

3) 对 CA_2 进行 $l \times l$ 分块,并对得到的每个子块作 SVD 运算;提取出每个子块的左奇异矩阵 S_L_i 和右奇异矩阵 S_R_i ,并计算 S_L_i 的均值最大值 Mav_l 以及 S_R_i 的均值最大值 Mav_r :

$$\begin{cases} Mav_l = \text{MAX}(|\text{mean}(S_L_i)|) \\ Mav_r = \text{MAX}(|\text{mean}(S_R_i)|) \end{cases} \quad (7)$$

式中: $i \in [1, \frac{M \times N}{(4l)^2}]$, $\text{mean}(\ast)$ 代表求矩阵平均值, $|\ast|$ 代表取绝对值, $\text{MAX}(\ast)$ 代表求最大值。

4) 提取出每个子块的最大奇异值,构造成矩阵 $S_MAX(i, j)$,以平均亮度最小的第 $object$ 行作为目标行:

$$object = i, \text{ if } \text{MIN}(\mu_i + \sigma_i) \quad (8)$$

式中: $i \in [1, \frac{M}{4l}]$, $j \in [1, \frac{N}{4l}]$, $object \in [1, \frac{M}{4l}]$, $\text{MIN}(\ast)$ 表示求最小值, μ_i 为每行元素平均值, σ_i 为每行元素标准差。

5) 用式(4)计算出 S_MAX 中每一行 S_MAX_i ($1 \leq i \leq \frac{M}{4l}$) 与目标行 S_MAX_{object} 的修正余弦相似性,选取相似性最高的前 m 行作为水印嵌入行,并记录所选取的各行位置 $index1$ 。

6) 对 $S5$ 所选取每行中的各元素与该行平均值之差

的绝对值升序排序,选取每行前 n 个与平均值最近
 的值作为待嵌入水印的奇异值,并记录每行所选取的元
 素位置 $index2$;将 $index1$ 和 $index2$ 存入密钥 key 中保存。

$$sort(|S_MAX_{i,j} - \mu_i|) \tag{9}$$

式中: $i \in [1, m], j \in [1, \frac{N}{4l}]$, $| * |$ 表示取绝对值,
 $sort(*)$ 表示升序排序。

7) 将步骤 5), 6) 所选取出的奇异值组成矩阵 S_S ,
 其大小为 $m \times n$, 与水印图像一致;将水印 W_m 量化嵌入
 到 S_S 中:

$$S_S'_{i,j} = \begin{cases} (k_{i,j} - 0.5) \times \beta, \text{mod}(k_{i,j} + W_m(i,j), 2) = 1 \\ (k_{i,j} + 0.5) \times \beta, \text{mod}(k_{i,j} + W_m(i,j), 2) = 0 \end{cases} \tag{10}$$

式中: $i \in [1, m], j \in [1, n]$, $k_{i,j} = \text{round}(S_S_{i,j}/\beta)$,
 β 为量化步长,且 $\beta = \text{floor}(\beta_0 \times (Mav_l + Mav_r))$, β_0
 为步长调节系数。

8) 将量化完成的 S_S' 中每个元素按照初始位置代
 入至矩阵 S_MAX 中,进而还原成其所属奇异值对角矩
 阵,然后作 SVD 逆运算,得到含有水印信息的低频分量
 CA_2^w 。

9) 对 CA_2^w 以及 S2 中所获得的 CV_2 、 CH_2 与 CD_2 作二
 级逆 DWT,产生含水印图像 I' 。

3.3 水印提取

水印提取与嵌入为互逆过程,其流程如图 2 所示。

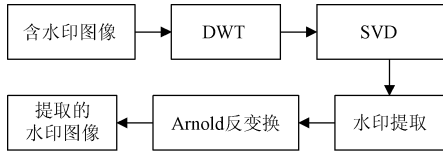


图 2 水印提取流程

Fig. 2 Flow chart of watermarking extraction

水印提取算法描述如下:

1) 对含水印图像 I' 作二级 DWT,获取所得低频分量

CA_2^w , 然后再作 $l \times l$ 分块处理。

2) 对分块后的每个子块作 SVD 运算,之后提取每个
 子块的左奇异矩阵 $S_L'_i$ 与右奇异矩阵 $S_R'_i$,并计算
 $S_L'_i$ 的均值最大值 Mav_l' 与 $S_R'_i$ 的均值最大值
 Mav_r' :

$$\begin{cases} Mav_l' = \text{MAX}(|\text{mean}(S_L'_i)|) \\ Mav_r' = \text{MAX}(|\text{mean}(S_R'_i)|) \end{cases} \tag{11}$$

3) 提取出各个子块的最大奇异值,并构造成矩阵 $S_MAX(i,j)'$,
 用密钥 key 中的 $index1$ 提取嵌入水印的前 m
 行,用 $index2$ 提取每行嵌入水印的前 n 个奇异值,把所有
 提取出来的奇异值组成矩阵 S_S' 。

4) 提取水印 W'_m 如下:

$$W'_m(i,j) = \begin{cases} 1, & \text{mod}(k'_{i,j}, 2) = 1 \\ 0, & \text{mod}(k'_{i,j}, 2) = 0 \end{cases} \tag{12}$$

式中: $k'_{i,j} = \text{floor}(S_S'_{i,j}/\beta')$, β' 为量化步长,且 $\beta' =$
 $\text{floor}(\beta_0 \times (Mav_l' + Mav_r'))$ 。

5) 用式(6)对 W'_m 解密,获得提取水印图像 W' 。

4 实验结果与分析







实验平台: Windows 7 + MATLAB R2015b;载体图像:
 512 × 512 的灰度图像 Lena 和 Baboon;水印图像: 32 × 32
 的二值图像“数字水印”;实验参数: $\beta_0 = 36$ 。

4.1 安全性评价

本文对水印图像进行 Arnold 变换扰乱加密,必须持
 有 Arnold 变换次数和水印阶数,才能正确解密并提取水
 印。载体图像、原始水印、含水印图像以及分别用正确密
 钥与错误密钥提取出来的水印见表 1。正确密钥所提取
 出水印的归一化相关系数(normalized correlation, NC)为
 1,相较于原始水印不存在丝毫差别;而错误密钥不能够
 正确地把水印提取出来,从而有效地保证了水印的安全
 性。

表 1 载体图像和水印

Table 1 Carrier image and watermarking

载体图像名称	载体图像	原始水印	含水印图像	含水印图像的 PSNR	正确密钥提取水印	正确密钥提取水印的 NC	错误密钥提取水印
Lena		数字水印		46.123 6 dB	数字水印	1	
Baboon		数字水印		45.037 6 dB	数字水印	1	

4.2 透明性评价

比较表 1 中水印嵌入前后的图像,主观视觉上无法甄别两者有无差异。Lena 与 Baboon 在水印嵌入之后,各自的峰值信噪比(peak signal to noise ratio, PSNR)分别为 46.1236 与 45.0376 dB,当 PSNR > 30 dB 时,图像通常情况下呈现出较高视觉质量^[18];如果 PSNR > 36 dB,则 HVS 难以分辨有无差异。与文献[12]相比,含水印图像 Lena 和 Baboon 的 PSNR 值均高出 4 dB 以上。HVS 的主观甄别、PSNR 值的客观评价以及相关文献的对比均表明本文水印具有优良的透明性。

4.3 鲁棒性评价

为检验本文算法鲁棒性,分别对含水印图像 Lena 与 Baboon 实施攻击。1)噪声攻击:高斯噪声(GN)、椒盐噪声(SN)以及乘积性噪声(SP);2)滤波攻击:高斯低通滤波(GF)、中值滤波(MF)以及均值滤波(AF);3)剪切攻击:剪切左上角(CL)、剪切中心(CC);4)JPEG 压缩(JP);5)混合攻击:混合攻击 1(JPEG70 + 剪切中心 1/16, HA1)、混合攻击 2(JPEG70 + 3 × 3 中值滤波, HA2)以及混合攻击 3(JPEG70 + 3 × 3 高斯低通滤波, HA3),攻击后提取水印,计算 NC 值并与文献[12]比较,实验结果如表 2 和 3 所示。

表 2 含水印图像 Lena 受攻击实验
Table 2 Attack experiment for watermarked image Lena

攻击方式	无攻击	GN(0.0001)	GN(0.0003)	SN(0.003)	SN(0.005)	SP(0.003)	SP(0.005)	GF(3 × 3)	MF(3 × 3)
提取水印									
本文 NC	1	1	0.992 0	0.958 1	0.925 9	0.963 2	0.929 4	0.996 3	0.979 5
文献[12]NC	0.998 3	0.984 4	0.962 3	0.950 5	0.928 5	-	-	0.929 1	0.953 5
攻击方式	AF(3 × 3)	CL(1/16)	CC(1/16)	JP(Q = 50)	JP(Q = 40)	JP(Q = 30)	HA1	HA2	HA3
提取水印									
本文 NC	0.957 0	0.931 9	0.933 6	1	0.987 5	0.966 6	0.920 8	0.969 1	0.982 4
文献[12]NC	-	0.922 5	0.928 3	0.960 8	0.952 6	0.928 1	0.909 1	0.958 8	0.919 9

表 3 含水印图像 Baboon 受攻击实验
Table 3 Attack experiment for watermarked image Baboon

攻击方式	无攻击	GN(0.0001)	GN(0.0003)	SN(0.003)	SN(0.005)	SP(0.003)	SP(0.005)	GF(3 × 3)	MF(3 × 3)
提取水印									
本文 NC	1	1	0.994 1	0.967 6	0.938 2	0.969 8	0.941 8	0.989 0	0.974 3
文献[12]NC	0.998 0	0.988 8	0.965 5	0.972 7	0.937 4	-	-	0.919 2	0.917 7
攻击方式	AF(3 × 3)	CL(1/16)	CC(1/16)	JP(Q = 50)	JP(Q = 40)	JP(Q = 30)	HA1	HA2	HA3
提取水印									
本文 NC	0.945 3	0.932 5	0.936 0	1	0.992 0	0.982 5	0.925 3	0.962 3	0.978 7
文献[12]NC	-	0.937 4	0.929 5	0.978 7	0.971 4	0.943 3	0.916 7	0.901 4	0.905 0

由表 2 和 3 可知,含水印图像遭受上述单一和混合攻击之后,提取的水印均能清晰辨认;除了在混合攻击 1(Lena 和 Baboon)、强度为 0.005 的椒盐噪声攻击(Lena)以及强度为 0.005 的乘积性噪声攻击(Lena)这少数几种情况中,提取水印的 NC 值为 0.920 8、0.925 3、0.925 9 和 0.929 4 外,其余 NC 均在 0.93 以上;特别是在抵御强度为 0.000 1 的高斯噪声以及 Q = 50 的 JPEG 压缩这两种单一攻击时,提取水印的 NC 值都是 1,与原始水印没有丝毫差异,表明本文算法具备优良的鲁棒性,可有效抵御这些攻击。

与文献[12]相比,本文算法在遭受强度为 0.003 的椒盐噪声(Lena)、剪切左上角 1/16(Baboon)以及强度为 0.003 椒盐噪声(Baboon)这少数几种攻击之后提取水印的 NC 值比文献[12]略小,但抵御其余各类攻击时所提取水印的 NC 值均要高于文献[12],表明本文算法的鲁棒性整体上要强于文献[12]。

5 结论

提出一种融合 SVD 和 HVS 的小波域数字图像鲁棒

水印算法,算法充分利用SVD、HVS和DWT的优良特性,采用3种措施来均衡水印鲁棒性与透明性的矛盾:1)选取二级DWT低频子带分块的SVD为水印的嵌入域;2)根据HVS掩蔽特性以及修正的余弦相似性度量选择出水印嵌入的最佳位置;3)采用自适应的量化方式嵌入水印。实验结果说明,水印具备很好的透明性,含水印图像所对应PSNR值能达到45dB以上;在抵御多种单一水印攻击以及混合水印攻击时,水印均呈现出较强的鲁棒性;较好地解决了水印鲁棒性与透明性的矛盾。

参考文献

- [1] 吴一全,史骏鹏,陶飞翔. 基于SIFT和NMF-SVD的NSCT域抗几何攻击水印算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(7): 961-969.
WU Y Q, SHI J P, TAO F X. NSCT-domain image watermarking scheme robust to geometric attacks based on SIFT and NMF-SVD [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(7): 961-969.
- [2] 代舒,辛昕,钱振兴. 同态域JPEG可逆数据隐藏[J]. 电子测量技术, 2016, 39(11): 89-94.
DAI SH, XIN X, QIAN ZH X. Reversible data hiding in JPEG image based on homomorphic encryption [J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39(11): 89-90.
- [3] 甘甜,冯少彤,聂守平,等. 基于分块离散小波变换的图像信息隐藏与盲提取算法[J]. 物理学报, 2012, 61(8): 084203.
GAN T, FENG SH T, NIE SH P, et al. An image hiding and blind extraction algorithm based on block discrete wavelet transform [J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(8): 084203.
- [4] KEYVANPOUR M, BAYAT F M. Blind image watermarking method based on chaotic key and dynamic coefficient quantization in the DWT domain [J]. Mathematical and Computer Modelling, 2013, 58(1-2): 56-67.
- [5] NGUYEN P B, BEGHDAI A, LUONG M. Perceptual watermarking using a new just-noticeable-difference model [J]. Signal Processing: Image Communication, 2013, 28(10): 1506-1525.
- [6] 周美丽,白宗文. 基于HVS的压缩域数字水印嵌入系统的设计[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(4): 78-80.
ZHOU M L, BAI Z W. Design of digital watermarking system based on HVS in compressed domain [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2015, 34(4): 78-80.
- [7] WU X T, SUN W. Robust copyright protection scheme for digital images using overlapping DCT and SVD [J]. Applied Soft Computing, 2013, 13(2): 1170-1182.
- [8] 李文娜,孔祥勇,高立群,等. 基于多描述编码和小波变换的数字图像水印算法[J]. 东北大学学报:自然科学版, 2012, 33(8): 1094-1097.
LI W N, KONG X Y, GAO L Q, et al. A novel image watermarking algorithm based on multiple description coding and wavelet transform [J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2012, 33(8): 1094-1097.
- [9] PARAH S A, SHEIKH J A, LOAN N A. Robust and blind watermarking technique in DCT domain using inter-block coefficient differencing [J]. Digital Signal Processing, 2016, 53: 11-24.
- [10] 刘真,白韬韬,卢鹏. 一种解密图像无背景噪声的加密全息数字水印技术[J]. 光学学报, 2015, 35(2): 0209002.
LIU ZH, BAI T T, LU P. Encrypted holographic watermarking technology with decrypted image superposed no noise [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(2): 0209002.
- [11] HORNG S J, ROSIYADI D D, LI T R, et al. A blind image copyright protection scheme for e-government [J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2013, 24(7): 1099-1105.
- [12] 叶天语. DWT-SVD域全盲自嵌入鲁棒量化水印算法[J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(6): 644-650.
YE T Y. Perfectly blind self-embedding robust quantization-based watermarking scheme in DWT-SVD domain [J]. Journal of Image and Graphics, 2012, 17(6): 644-650.
- [13] 李旭东. 抗亮度和对比度攻击的DCT域图像数字水印算法[J]. 光电子·激光, 2013, 24(6): 1184-1190.
LI X D. Image digital watermarking algorithm in DCT domain for resisting brightness-and-contrast adjusting attack [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2013, 24(6): 1184-1190.
- [14] MISHRA A, AGARWAL C, SHARMA A, et al. Optimized gray-scale image watermarking using DWT-SVD and firefly algorithm [J]. Expert Systems with Applications, 2014, 41(17): 7858-7867.
- [15] ALI M, AHN C W, PANT M, et al. An image watermarking scheme in wavelet domain with optimized compensation of singular value decomposition via artificial bee colony [J]. Information Sciences, 2015, 301: 44-60.

- [16] 封明坤, 赵生妹, 施祥. 视觉多通道梯度与低阶矩自适应图像评价[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(11): 2531-2537.
FENG M K, ZHAO SH M, SHI X. Adaptive image quality assessment based on visual multi-channel gradient and low order moment [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(11): 2531-2537.
- [17] 冷亚军, 陆青, 梁昌勇. 协同过滤推荐技术综述[J]. 模式识别与人工智能, 2014, 27(8): 720-734.
LENG Y J, LU Q, LIANG CH Y. Survey of recommendation based on collaborative filtering [J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2014, 27(8): 720-734.
- [18] 姜传贤, 杨铁军, 董明刚, 等. 基于线性空间隐藏模型的可逆图像水印算法[J]. 自动化学报, 2014, 40(10): 2324-2333.
JIANG CH X, YANG T J, DONG M G, et al. A reversible image watermarking algorithm using linear space hiding model [J]. Acta Automatica Sinica, 2014, 40(10): 2324-2333.

作者简介



任克强, 1993 于华中理工大学获得硕士学位, 现为江西理工大学教授、硕士生导师, 主要研究方向为图像与视频处理、信息隐藏、无线传感器网络。

E-mail: renkeqiang@21cn.com

Ren Keqiang received M. Sc. from Huazhong University of Science and Technology in 1993. Now he

is professor and M. Sc. tutor in Jiangxi University of Science and Technology. His main research interests include image and video processing, information hiding, and wireless sensor network.



梁亮亮, 2014 年于江西理工大学获得学士学位, 现为江西理工大学硕士研究生, 主要研究方向为信息隐藏。

E-mail: 1014530704@qq.com

Liang Liangliang received B. Sc. from Jiangxi University of Science and Technology in 2014. Now he is M. Sc. candidate in Jiangxi University of Science and Technology. His main research interest includes information hiding.



喻玲娟, 2004 年于赣南师范大学获得学士学位, 2009 年于华南理工大学获得硕士学位, 2012 年于中国科学院空间科学与应用研究中心获得博士学位, 现为江西理工大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为合成孔径雷达成像处理、图像处理。

E-mail: yljsmile@163.com

Yu Lingjuan received B. Sc. from Gannan Normal University in 2004, M. Sc. from South China University of Technology in 2009, and Ph. D. from National Space Science Center, Chinese Academy of Science, in 2012, respectively. Now she is associate professor and M. Sc. tutor in Jiangxi University of Science and Technology. Her main research interests include synthetic aperture radar imaging and image processing.