

基于混沌和 HVS 的小波域自适应图像水印算法^{*}

李 峰, 陈光喜, 丁 勇, 潘黄琼, 刘燕雄

(桂林电子科技大学 数学与计算科学学院, 广西 桂林 541004)

摘 要: 针对常规的小波域水印算法自适应性差的缺陷, 提出了一种新的基于混沌和人类视觉系统的小波域自适应图像水印算法。首先对载体图像进行二级 DWT 变换; 然后对特定的中频子带进行分块, 并对每块做 SVD 分解; 最后将 Logistic 混沌置乱后的二值水印信息嵌入到每块的最大奇异值中, 嵌入的强度根据 HVS 原理自适应地进行调整。仿真实验表明, 该算法不仅具有很好的不可见性, 且对 JPEG 压缩、加噪、滤波等常见的图像攻击具有很强的鲁棒性。

关键词: 数字水印; 混沌; 人类视觉系统; 离散小波变换; 自适应; 奇异值分解

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2012)06-2224-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.06.059

Adaptive image watermarking algorithm in wavelet domain based on chaos and HVS

LI Feng, CHEN Guang-xi, DING Yong, PAN Huang-qiong, LIU Yan-xiong

(School of Mathematics & Computational Science, Guilin University of Electronic Technology, Guilin Guangxi 541004, China)

Abstract: Aiming at the defect of self-adaptability in normal digital watermarking algorithm in DWT domain, this paper proposed an adaptive image watermarking algorithm based on chaos and HVS in DWT domain. Firstly, applied a two-level DWT to the cover image. Secondly, divided a specific middle frequency sub-band into many blocks which decomposed with SVD. Finally, adaptively embedded the binary watermark image with Logistic chaos scramble into the largest singular value of each block. It self-adaptively adjusted the embedding intensity according to the quantization step of each block. Simulation results prove this algorithm has a good transparency and robustness against attacks such as JPEG compression, adding noise, filtering and other image manipulations.

Key words: digital watermarking; chaos; human visual system(HVS); discrete wavelet transform(DWT); self-adaptability; singular value decomposition(SVD)

0 引言

随着计算机与通信技术的快速发展以及图像编辑软件的广泛应用,数字产品(图像、音频、视频等)被非法复制、篡改、利用等现象日益严重,对数字产品的版权保护和真伪鉴别也变得愈加迫切。数字水印技术的发展为此提供了一个有效的解决途径^[1]。

一般水印算法应有如下特点,即可证明性、鲁棒性、不可见性(透明性)、无歧义性。水印可以分为脆弱水印、半脆弱水印和鲁棒水印。脆弱水印和半脆弱水印主要用于数字作品完整性认证;鲁棒水印是在数字产品中加入作品版权信息,如作者信息、公司标志、序列号等。它可以保证在经过常见的编辑处理后仍能提取出有效的版权信息。因此鲁棒水印更具有应用价值,成为近年来的研究热点。

按嵌入到载体中位置的不同可以分为时域水印和频域水印。时域水印是直接载体中嵌入水印信息。时域水印算法简单有效,但鲁棒性较差。频域数字水印算法是将水印信息嵌入到数字图像的离散余弦变换域^[2,3](DCT)或离散小波变换

域^[4,5](DWT)等。该类算法操作复杂,但是抗攻击能力强,特别是基于 DWT 的水印算法抗 JPEG 压缩的鲁棒性很强。Liu 等人^[6]提出了一种基于奇异值分解(SVD)的鲁棒水印算法。近年来提出了一系列基于 SVD 的频域水印算法,例如刘锋等人^[7]提出了一种基于 SVD 的 DCT 域的水印算法,有很强的鲁棒性,但算法没有可证明性^[8];包锐等人^[9]提出了一种基于 CDMA 和 SVD 的 DWT 上的水印算法,但水印提取时计算量大。虽然这些算法取得了一定的进步,但是在水印的鲁棒性方面还有待进一步的改进。

本文结合混沌和人类视觉系统模型(HVS)提出了一种 DWT 域上的自适应水印算法。以二值图像为水印信息,这具有普遍的代表性。许多有意义的标志图像、序列号码都是以二值图像的形式显示。

1 相关理论分析

1.1 小波变换理论

近年来小波变换理论得到了很大的发展,它是一种信号的

收稿日期: 2011-10-10; **修回日期:** 2011-11-24 **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(60963024);广西学位与研究生教育改革发展专项课题资助(200910595R06)

作者简介: 李峰(1986-),男,河南人,硕士研究生,主要研究方向为数字水印(lifengheishi@163.com);陈光喜(1971-),男,教授,博士,主要研究方向为智能算法、信息隐藏;丁勇(1975-),男,教授,博士,主要研究方向为信息安全;潘黄琼(1987-),女,硕士研究生,主要研究方向为数字水印;刘燕雄(1986-),男,硕士研究生,主要研究方向为图像处理。

时频分析方法,具有多分辨率分析的优点,能很好地表现信号的时间(空间)频域的局部特性^[10,11]。函数 $f(t)$ 的连续小波变换^[12]定义为

$$(W_{\psi}f)(a,b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-a}{b}\right) dt \quad a, b \in \mathbb{R}, a \neq 0$$

其中: $\psi(t)$ 满足允许性条件, $f(t) \in L^2(\mathbb{R})$ 。

在图像处理中小波理论的基本思想是把图像进行多分辨率分解,分解成不同频带、不同空间的子图像。图像经过一级二维小波变换后得到四个子图像:低频分量 LL、中频分量 HL 和 LH 以及高频分量 HH。其中低频分量 LL 包含了原始图像的绝大部分能量和原始图像的基本特征,因此称为近似分量。中频和高频分量具有较少的能量,体现原始图像的细节特征,称为细节分量。图像的二级小波分解如图1所示。

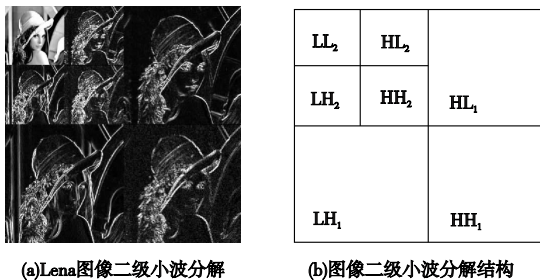


图1 图像的二级小波分解

低频区域包含图像的基本特征,在低频中嵌入水印可以很好地抵御加噪、压缩等攻击,算法的鲁棒性较强。但是人眼对低频部分的变化比较敏感,算法的不可见性较差。图像的高频区域主要代表图像的细节部分,即图像纹理变化。根据 HVS 模型,人眼对高频纹理变化不太敏感,所以算法的不可见性较好,但是算法的鲁棒性较差。因此本文将水印嵌入到图像的中频,以平衡鲁棒性和不可见性并提高水印的嵌入量。

1.2 Logistic 混沌置乱

图像处理技术中运用置乱技术来降低像素之间的相关性。即使攻击者提取出了水印信息,若不知道置乱算法也不能恢复出水印图像,这增强了水印算法的安全性。比较常用的置乱方法有 Arnold 变换、Hibert 扫描、幻方变换、混沌加密。本文使用混沌加密技术置乱水印图像。

混沌现象^[13]是非线性动力系统中出现的具有确定性、类随机性的过程。而且混沌序列非周期、有界但不收敛、对初始值极其敏感。混沌序列形式简单,只需混沌映射参数和初始值 x_0 就可以方便地产生和再生。Logistic 映射^[14]是一种常用的混沌系统,其模型定义为

$$x_{n+1} = \lambda x_n (1 - x_n) \quad \lambda \in [3.56994568, 4], x_n \in [0, 1]$$

根据给出的一段有限长的 Logistic 混沌序列很难推断出它的初始值 x_0 。因此使用 Logistic 混沌置乱技术加密二值水印图像可以提高水印算法的安全性。

1.3 人类视觉系统模型

人类视觉系统^[15,16](HVS)是视觉信息处理系统,具有频率掩蔽、照度掩蔽和纹理掩蔽等特性。HVS 是一个低通滤波型的系统,对太高的频率不敏感,分辨景物的能力有限,所以高频区能嵌入较多水印。一般来说,人眼对亮度的响应具有对数非线性的性质。对高亮度区亮度的改变敏感度较小,对低亮度区亮度的改变敏感度大,即图像背景亮度越高,所能嵌入的水印信息就越多。根据图像的纹理复杂度,图像可分为纹理平滑

区和纹理密集区。视觉系统对于平滑区的敏感性要远高于纹理密集区,所以图像的纹理密集区相对平滑区可嵌入较多的水印信息。

为了提高水印算法的鲁棒性,应利用人类视觉掩蔽特性在满足不可见性的前提下,合理控制水印信号强度,尽可能提高水印信息的嵌入量。根据 HVS 的频率掩蔽性和高频部分容易被过滤掉这一特点,应将水印嵌入到载体图像变换域的中频部分。根据照度掩蔽特性,应在载体图像亮度较大的部分嵌入较多能量的水印。本文用子块的灰度平均值来衡量图像的亮度特征。根据纹理掩蔽特性,在图像的平滑区域嵌入过多的水印信息容易引起块效应,导致图像品质下降。所以应将水印信息更多地嵌入到纹理复杂区域。本文用子块的方差值来衡量子块纹理的复杂程度。

结合文献[9]中的视觉掩蔽模型,给出本文载体图像的区域掩蔽特征值的计算方法。假设图像区域为 I ,则其掩蔽特征值为

$$d = \mu + \alpha \times v + \beta \times \sigma$$

其中: α 、 β 、 μ 为参数; v 为区域 I 的平均灰度值; σ 为区域 I 的灰度标准差。量化步长越大代表可嵌入的水印信息能量越大。

1.4 奇异值分解

奇异值分解(SVD)是线性代数中一个有效的工具,它在图像压缩、统计分析、信号处理中应用广泛。关于矩阵奇异值分解的定义^[16]如下:

设 $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$,则存在 $U \in \mathbb{U}_m$ 和 $V \in \mathbb{U}_n$,使得

$$U^T A V = \begin{bmatrix} \Sigma_r & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中: $\Sigma_r = \text{diag}(\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_r) \in \mathbb{R}^r$, $\delta_1 \geq \delta_2 \geq \dots \geq \delta_r > 0$, $\mathbb{U}_m$ 表示 $M \times M$ 的正交矩阵;分解式(1)称做 A 的奇异值分解(SVD)。

令 $S = \begin{bmatrix} \Sigma_r & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$,所以有 $S = U A V^T$ 。 S 称为 A 的奇异值矩阵,

U 、 V 分别称为 A 的左、右奇异矩阵。

数字图像可以看做一个非负的实矩阵,奇异值体现着图像的亮度特征。在数字图像处理中应用奇异值分解的主要理论依据^[16]是:a)奇异值对应于图像的能量特性(亮度特性),而非纹理特性;b)奇异值所表现的是图像的内蕴特性,反映的是图像矩阵元素之间的统计关系;c)奇异值具有相当好的稳定性,当图像受到修改或攻击时,它的奇异值不会发生大的变化;d)矩阵奇异值分解得到的奇异值中,第一个奇异值要比其他的奇异值大得多。

2 数字水印算法

本文算法的基本思想是:采取二值图像作为水印信号,首先对水印信息通过 Logistic 混沌加密技术进行加密,去除水印图像的自相关性,使其类似随机分布,同时对载体图像进行两次小波变换;然后对中频子带 HL₂ 进行分块,计算每块的量化步长,并对各个子块进行奇异值分解;最后根据量化步长在最大奇异值中自适应地嵌入水印信息。

2.1 数字水印嵌入算法

设载体图像为 512×512 的灰度图像 I ,水印图像为 32×32 的二值图像 W ,载体图像分块大小为 4×4 。

a)对水印图像进行置乱。根据给定的 Logistic 混沌系统

参数 λ 和初值 x_0 产生一组长度为 1 024 的类随机序列 $h = \{h_1, h_2, \dots, h_{1024}\}$, 然后把 h 序列按降序排列产生新的序列 $h' = \{h'_1, h'_2, \dots, h'_{1024}\}$ 。将水印图像按行扫描并按照 h' 的新顺序将水印重新排列, 产生新的水印信息 w' 。

b) 对载体图像 I 进行二级小波分解 DWT, 得到一个低频子带和六个中高频子带。对二级小波分解后得到的中频 HL_2 频带(图 1(b))进行分块处理并按行排列子块, 记为 $HL_{2i} (i \in 1, 2, \dots, 1\ 024)$, 每块大小为 4×4 。

c) 依次对每块 HL_{2i} 进行如下处理:

(a) 对 HL_{2i} 进行 SVD 分解, 得到奇异值矩阵 $S = \text{diag}(\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4)$ 和左、右奇异矩阵 U, V 。

(b) 计算 HL_{2i} 的量化步长 $d(i)$ 。根据 HVS 原理, 量化步长为

$$d(i) = \mu + \alpha \times v(i) + \beta \times \sigma(i) \quad i \in 1, 2, \dots, 1024$$

(c) 量化 HL_{2i} 的最大奇异值 δ_1 。将子块 HL_{2i} 的最大特征值用量化步长量化:

$$q(i) = \lceil \frac{\delta_1}{d(i)} \rceil \quad i \in 1, 2, \dots, 1024$$

(d) 嵌入水印。根据式(2)得到子块 HL_{2i} 嵌入水印后的最大特征值:

$$\delta'_1 = \begin{cases} \delta_1 + d(i) & \text{if } \text{mod}(q(i), 2) \neq w'_i \\ \delta_1 & \text{if } \text{mod}(q(i), 2) = w'_i \end{cases} \quad (2)$$

(e) 用修改后的最大特征值 δ'_1 代替原来的最大特征值 δ_1 , 得到修改后的奇异值矩阵 $S' = \text{diag}(\delta'_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4)$ 。进行奇异值分解的逆运算, 得到含有水印信息的子块 HL'_{2i} :

$$HL'_{2i} = U \times S' \times V^T$$

(f) 重复上述过程, 直到中频 HL_2 频带的每一子块 $HL_{2i} (i \in 1, 2, \dots, 1\ 024)$ 都嵌入了水印信息。

d) 做逆小波变换。用含有水印信息的中频子带 HL_2 和没有修改的其他子带做二级逆小波变换 IDWT, 得到含水印的图像。

2.2 数字水印提取算法

水印的提取是水印嵌入的逆过程。设 I' 是经过攻击后的待检测图像。

a) 对待检测图像 I' 进行二级小波分解 DWT, 得到一个低频子带和六个中高频子带。对二级小波分解后得到的中频 HL'_2 频带进行分块处理并按行排列子块, 记为 $HL'_{2i} (i \in 1, 2, \dots, 1\ 024)$, 每块大小为 4×4 。

b) 依次对每块 HL'_{2i} 进行如下处理:

(a) 对 HL'_{2i} 进行 SVD 分解, 得到奇异值矩阵 $S = \text{diag}(\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4)$ 。

(b) 计算载体图像子块 HL'_{2i} 嵌入水印时的量化步长 $d(i)$ 。计算方法参考水印嵌入算法。

(c) 量化 HL'_{2i} 的最大奇异值 δ'_1 。将子块 HL'_{2i} 的最大特征值用量化步长 $d(i)$ 量化:

$$q(i) = \lceil \frac{\delta'_1}{d(i)} \rceil \quad i \in 1, 2, \dots, 1024$$

(d) 提取水印信息:

$$w_i = \begin{cases} 0 & \text{mod}(q(i), 2) = 0 \\ 1 & \text{mod}(q(i), 2) = 1 \end{cases}$$

(e) 重复上述过程, 直到中频 HL'_2 频带的每一子块 $HL'_{2i} (i \in 1, 2, \dots, 1\ 024)$ 都提取出嵌入加密的水印信息。

c) 解密提取出的水印信息。

根据嵌入水印时 Logistic 混沌序列的系统参数 λ 和初值 x_0 , 再生一组长度为 1 024 的类随机序列。此序列即为嵌入时用到的混沌序列, 并根据按降序排列时顺序的变化规律, 逆向将提取出来的加密水印信息进行解密, 得到提取出的水印信息 W' 。

3 实验与结果分析

本文在 MATLAB R2010b 平台下进行了大量仿真实验。实验以 Lena(512 × 512) 灰度图像为载体图像, 以二值图像(32 × 32) 为水印图像。计算量化步长的公式中 $\mu = 1, \alpha = 0.067, \beta = 1.333$ 。Logistic 混沌序列的系统参数 $\lambda = 3.787$, 初值 $x_0 = 0.423$ 。本文采用峰值信噪比 PSNR(peak single-to-noise ratio) 来衡量原始载体图像和嵌入水印后图像的相似性, 它的值越大, 说明嵌入水印后图像的保真度越好, 定义如下:

$$\text{PSNR} = 10 \times \log_{10} \left[\frac{M \times N \times 255^2}{\sum \sum (r_{ij} - r'_{ij})^2} \right]$$

其中: M, N 为载体图像的高和宽; r_{ij}, r'_{ij} 分别为原始载体图像和嵌入水印信息后载体图像 (i, j) 位置的像素值。采用归一化相关系数 NC (normalized correlation coefficient) 来评价提取出的水印 W' 和原始水印 W 的相似性, NC 值越大, 表明 W' 与 W 越相似, 定义为

$$NC = \frac{\sum \sum w_{ij} \otimes w'_{ij}}{m \times n}$$

其中: m, n 为水印图像的高和宽; w_{ij}, w'_{ij} 分别为嵌入的水印图像和提取出的水印图像 (i, j) 位置的像素值; $\otimes$ 为逻辑异或运算。原始图像、含水印图像及实验结果如图 2 所示。由图 2 可以看出, 原始载体图像和含水印的载体图像在视觉上看不出差别, $\text{PSNR} = 42.534\ 8$, 这符合水印算法的不可见性要求。在未受到任何攻击的情况下, 提取的水印图像(图 2(d))和原始水印图像(图 2(b))之间的相似度 $NC = 0.993\ 2$ 。实验结果表明, 本文算法不可见性很好, 而且含有水印的载体图像在没有受到任何攻击的情况下, 能将嵌入的水印几乎无失真地提取出来。



图2 原始图像、含水印图像及实验结果

图 3 是对含水印的 Lena 图像进行不同程度的 JPEG 压缩后提取的水印信息。表 1 中有不同的压缩质量下提取的水印图像的 NC 值。图 3 和表 1 表明, 随着 JPEG 压缩质量系数的减小, NC 值也不断下降, 但是压缩质量系数为 40% 时仍能识别出嵌入的水印信息, 能够起到版权保护的作用。实验结果表明本文算法对 JPEG 压缩有很好的鲁棒性。

图 4 是对含水印的 Lena 图像分别进行高斯噪声 ($v = 0.001$)、椒盐噪声 ($d = 0.05$)、高斯低通滤波、缩放 ($f = 0.5$) 四种攻击后提取的水印信息。表 1 列出了含水印 Lena 图像经过多种攻击后提取的水印信息的归一化系数 NC 。表 2 列出了 Lena、Baboon、Boat、Peppers 四幅图像按照本文算法使用相同参数嵌入水印, 然后经过多种攻击实验提取的水印信息的归一化

系数 NC 。

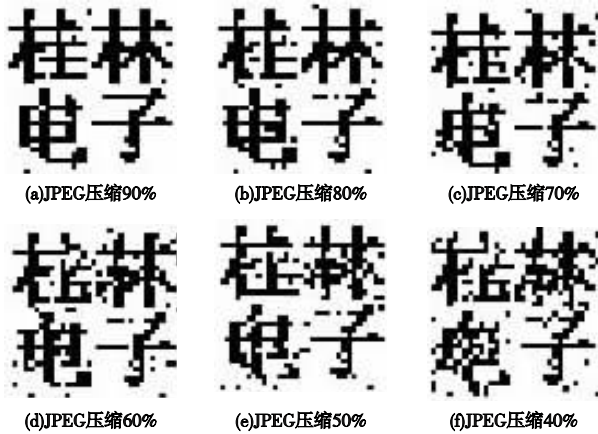


图3 含水印Lena图像受JPEG压缩后提取出的水印图像

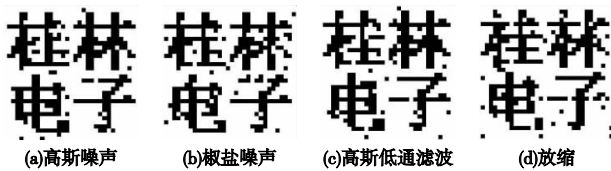


图4 含水印Lena图像受攻击后提取出的水印图像

表1 含水印Lena图像受多种攻击实验结果

攻击方式	PSNR	NC
无攻击	42.534 8	0.993 2
JPEG 压缩 90%	41.327 2	0.959 0
JPEG 压缩 80%	40.458 2	0.953 1
JPEG 压缩 70%	39.813 4	0.919 9
JPEG 压缩 60%	39.192 4	0.924 8
JPEG 压缩 50%	38.610 2	0.886 7
JPEG 压缩 40%	37.956 5	0.865 2
高斯噪声 ($v=0.001$)	29.742 9	0.927 8
高斯噪声 ($v=0.005$)	22.998 3	0.865 8
高斯噪声 ($v=0.01$)	20.056 1	0.843 9
椒盐噪声 ($d=0.02$)	22.359 3	0.864 7
椒盐噪声 ($d=0.05$)	18.355 8	0.786 6
中值滤波 3×3	39.293 6	0.894 3
高斯低通滤波	40.467 7	0.942 8
放缩 ($f=0.5$)	39.029 9	0.925 2

表2 不同载体图像实验结果 (NC)

攻击方式	Lena	Baboon	Boat	Peppers
PSNR	42.534	42.995	41.999	42.543
无攻击	0.994 2	0.989 3	0.989 7	0.992 5
JPEG 压缩 90%	0.959 0	0.960 0	0.967 8	0.962 8
JPEG 压缩 80%	0.953 1	0.941 4	0.934 6	0.940 4
JPEG 压缩 70%	0.929 9	0.920 9	0.919 7	0.906 2
JPEG 压缩 60%	0.914 8	0.883 8	0.900 4	0.899 8
JPEG 压缩 50%	0.886 7	0.878 9	0.884 8	0.871 0
JPEG 压缩 40%	0.865 2	0.826 2	0.839 8	0.847 6
高斯噪声	0.927 8	0.931 5	0.957 0	0.911 1
椒盐噪声	0.886 0	0.863 3	0.896 4	0.889 6
中值滤波 3×3	0.894 3	0.903 3	0.917 9	0.898 4
高斯低通滤波	0.942 8	0.941 9	0.935 5	0.916 0
放缩 (0.5)	0.925 2	0.915 8	0.915 0	0.909 4

仿真实验结果表明,从受到攻击的含水印图像中提取出的水印信息大部分都是清晰的,失真较小且 NC 值较高。因此本文算法对 JPEG 压缩、高斯噪声、椒盐噪声、中值滤波、高斯低通滤波和缩放攻击具有很强的鲁棒性,可以起到版权保护的作用。

4 结束语

本文提出了一种基于离散小波变换和奇异值分解的数字水印算法。Logistic 混沌置乱技术的应用破坏了水印图像的自相关性,提高了算法安全性。该算法根据 HVS 原理自适应地调整嵌入强度,既增强了算法的鲁棒性,又取得了良好的不可见性,达到了不可见性和鲁棒性的良好平衡。从 MATLAB 仿真实验效果可看出,该算法自适应性好、鲁棒性强,能有效地抵抗各种常见攻击。下一步研究重点是如何实现水印的盲检测。

参考文献:

- [1] 孙圣和,陆哲明. 数字水印处理技术[J]. 电子学报,2000,8(8): 85-90.
- [2] 黄西娟,王冰. 一种 DCT 变换域的鲁棒数字水印[J]. 计算机工程,2011,30(20): 145-148.
- [3] LIN S D, CHEN C F. A robust DCT-based watermarking for copyright protection[J]. IEEE Trans on Consumer Electronics, 2000, 46(3): 415-421.
- [4] HERNANDEZ G V, CRUZ R C, NAKANO M M, et al. Water marking algorithm based on the DWT[J]. Latin America Transactions, 2006, 4(4): 257-267.
- [5] 周鹏颖,沈磊,田小林,等. 基于小波—奇异值分解的数字水印新算法[J]. 计算机应用研究,2010,27(5): 1896-1897,1910.
- [6] LIU Ren-zhen, TAN Tie-niu. A SVD-based watermarking scheme for protecting right ownership[J]. IEEE Trans on Multimedia, 2002, 4(1): 121-128.
- [7] 刘锋,孙林军. 一种基于 DCT 和 SVD 的数字图像水印技术[J]. 计算机应用,2005,25(8): 1944-1945.
- [8] ZHANG Xiao-ping, LI Kan. Comments on an SVD-based watermarking scheme for protecting rightful Ownership[J]. IEEE Trans on Multimedia, 2005, 7(3): 593-594.
- [9] 包锐,张天骢,王玉娥,等. 基于人类视觉系统的 SVD 扩频水印算法[J]. 计算机应用研究,2011,28(8): 3054-3057.
- [10] 高铁杠,莫然. 一种基于小波系数动态量化的鲁棒数字水印算法[J]. 武汉大学学报:理学版,2011,57(5): 449-454.
- [11] 潘蓉,高有行. 基于小波变换的图像水印嵌入方法[J]. 中国图象图形学报,2002,7(7): 668-671.
- [12] 丁宣浩. 小波分析基础理论[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2007: 100-107.
- [13] 段文文,李碧. 基于混沌的数字图像置乱算法及参数优化[J]. 计算机应用研究,2011,28(1): 329-331.
- [14] 李赵红,侯建军. 基于 Logistic 混沌映射的 DCT 域脆弱数字水印算法[J]. 电子学报,2006,34(12): 2134-2137.
- [15] 罗鹏,苏旻,杨晓元,等. 基于人类视觉特性的自适应水印嵌入方案[J]. 计算机应用研究,2011,28(10): 3817-3819,3844.
- [16] 李慧灵. 基于 DWT 和 SVD 的数字水印算法[D]. 沈阳: 东北大学,2008.