

图文信息技术

基于 SIFT 变换和 DWT-SVD 的自适应图像水印算法

陈青, 伍东升

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要: **目的** 由于传统的自适应水印技术无法实现水印嵌入区域依据图像自身的特征而改变, 且抵抗几何攻击的能力较弱, 提出一种基于 SIFT 特征提取, 结合 DWT-SVD 的水印嵌入方法。**方法** 首先对图像进行 SIFT 特征提取, 然后利用 RANSAC 算法选取鲁棒性较好的特征点, 通过特征点选取合适大小的水印区域, 最后结合 DWT-SVD 算法将水印嵌入原始图像中。**结果** 采用 SIFT 变换结合 DWT-SVD 算法嵌入的水印, 含水印图像的视觉效果较好。含水印图像在没有受到攻击时, 可以无损地提取出水印; 在受到攻击时, 提取出的水印品质较好, NC 值均高于 0.96, 且算法的时间复杂度和空间复杂度均较小。**结论** 实验证明, 此方案在面对任意角度的旋转攻击, 以及常规图像处理攻击有很好的鲁棒性, 可以达到保护数字产品的目的。

关键词: 尺度不变特征变换; 自适应水印; 抗几何攻击; 奇异值分解

中图分类号: TP391.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2021)09-0254-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.09.036

Adaptive Image Watermarking Algorithm Based on SIFT Transform and DWT-SVD

CHEN Qing, WU Dong-sheng

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

ABSTRACT: Since the traditional adaptive watermarking technology cannot change the embedded area of the watermark according to the characteristics of the image itself, and its ability to resist geometric attacks is weak, a watermarking embedding method based on SIFT feature extraction combined with DWT-SVD is presented. Firstly, the SIFT feature is extracted from the image, then a feature point with good robustness is selected using RANSAC algorithm, a suitable size watermark area is selected according to the feature point, and then the watermark is embedded into the original image with DWT-SVD algorithm. The watermark embedded by SIFT transformation combined with DWT-SVD algorithm has a better visual effect. When the watermarked image is not attacked, the watermarks can be extracted losslessly. When it is attacked, the quality of the extracted watermarks is good, the NC value is higher than 0.96, and the time complexity and space complexity of the algorithm are small. Experiments show that this scheme has good robustness against rotation attacks at any angle and conventional image processing attacks, and can protect digital products.

KEY WORDS: scale invariant feature transformation; adaptive watermarking; anti geometric attack; SVD

随着数字化时代的到来, 信息化技术和多媒体技术的普及和发展, 在人们频繁地通过网络交换着信息

的同时, 另一些问题也愈发重要起来。数字信息的准确性和安全性被大家广泛关注, 尤其是数字信息被修

收稿日期: 2020-09-13

基金项目: 上海理工大学国家级项目培育基金 (16HJPY-MS06)

作者简介: 陈青 (1962—), 女, 博士, 上海理工大学副教授、硕导, 主要研究方向为信号处理。

改、复制和攻击等问题。数字水印则是将水印以人眼不可见的方式嵌入载体中,起到保护、鉴别和防篡改载体的作用^[1]。

数字水印技术发展以来,有在空间域嵌入水印,也有在频域嵌入水印,但是很难在非固定区域嵌入水印^[2]。同时,对整个载体进行算法的变换,也会带来巨大的计算量,而且选择在固定区域嵌入水印,也会给算法自身的安全性带来很大的困扰,在这样的情况下,自适应的数字水印技术就诞生了。自适应数字水印技术指嵌入水印的一些因素结合载体本身的特性或者特征,并且能够自适应调整水印的一些性质。一直以来很少做到嵌入水印的区域随着图像自身的特性而改变,大多数都是在以图像的中心做适度大小的圆形区域,这样的算法安全性和实用性并不突出。HE Y 等^[3]提出采用 DWT-DCT-SVD 的组合算法实现水印的嵌入,算法的时间开销很大,而且当含水印的载体图像遭到几何攻击后,从载体图像中提取出的水印的 PSNR 值和 NC 值不够好。ZEAR A 等^[4]提出了采用 DWT-DCT-SVD 的组合算法,并且对水印图像进行了 DWT-DCT 的分解,利用 BP 神经网络选取最匹配的嵌入强度,该算法在仿真中提取出水印的 NC 值很高,水印符合度较高,但是在遭受旋转攻击的时候,提取出来的水印表现很差。郑秋梅等^[5]提出了通过加权的 harris 变换提取出图像的角点特征,并且对提取出的角点进行筛选,选取符合条件的角点,由此决定符合条件的特征区域,并进行 DCT 变换,将水印嵌入 DCT 变换后的 DC 系数之中,实验较为复杂,且实验结果不够完善。李晓明等^[6]提出了一种通过 SIFT 变换实现图像配准的算法,通过使用 RANSAC 算法筛选特征点,当载体图像发生几何变换过后,仍然可以定位到图像特征点的位置。在光照不同,分辨率不同的条件下,均能保证非常好的鲁棒性,实验的匹配通过率高达 91%。该方法仅表明了算法的可行性,并且与数字水印领域的使用场景有一些差异。如何在图像遭遇图像攻击后,保证更好的匹配效果,是笔者研究的主要内容。

文中算法旨在通过图像自身的特点来决定水印的嵌入区域,通过 SIFT 变换提取出图像的特征点,并对大量的特征点进行 RANSAC 匹配,获取鲁棒性较好的特征点,之后对该区域进行 DWT-SVD 算法,在获取的奇异值中嵌入水印。

1 基本原理

1.1 Logistic 混沌序列加密

Logistic 混沌序列加密算法利用混沌信号对图像数据流进行加密,混沌的非线性和不规则性非常适合加密^[7]。Logistic 混沌序列的系统方程为:

$$X(k+1) = u \times X(k) \times (1 - X(k)) \quad k = 0, 1, \dots, n \quad (1)$$

式中: $X(0)$ 和 u 为选定的迭代初值。

1) 假设水印图像二维矩阵为 W , 选定密钥, 即迭代初值, 迭代 n 次, 计算得到加密的二维序列矩阵 B 。

2) 利用 W 矩阵和二维的序列矩阵 B 完成加密, 即 $W \oplus B$ 获得加密后的水印矩阵 W' 。解密时, 只需获得密钥, 再次进行混沌序列的计算, 获得 B 矩阵后, 即可通过异或的运算获得原水印图像。

如图 1 所示, 图 1a 为原始的水印图像, 图 1b 为经过 logistic 混沌加密后的水印图像。

1.2 SIFT 变换

尺度不变特征变换 (SIFT) 算法最早由 Lowe 提出, SIFT 变换即尺度不变特征变换是一种机器视觉的算法, 用于检测和描述图像的局部特征, 它在空间尺度中寻找极值点, 并且能够找出该极值点的位置、尺度和旋转不变数, 因此 SIFT 特征点对于图像的尺度变换和旋转变换是不变的量, 同时对光照和噪声等有较好的适应性^[8-10]。

1.2.1 SIFT 的尺度不变

将二维图像 $I(x, y)$ 应用在不同尺度的尺度空间中得到 $L(x, y, \sigma)$ 。 $L(x, y, \sigma)$ 计算公式为:

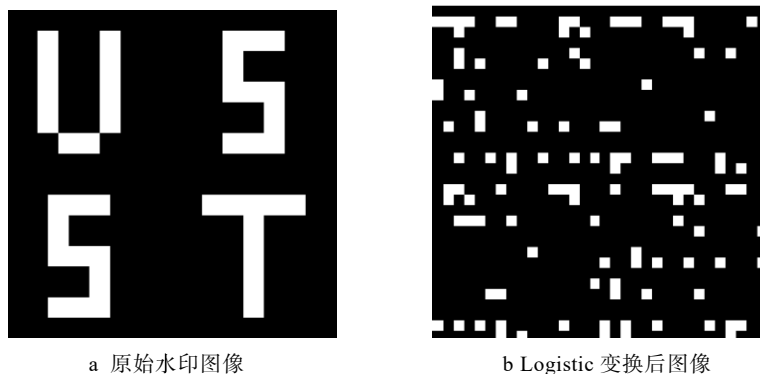


图 1 水印图像预处理
Fig.1 Watermark image preprocessing

$$L(x, y, \sigma) = G(x, y, \sigma) * I(x, y) \quad (2)$$

式中: $G(x, y, \sigma)$ 为二维高斯核函数; $G(x, y, \sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-(x^2+y^2)/2\sigma^2}$; x, y 为点的坐标; σ 为高斯正态分布的方差。

构建图像的 DOG 金字塔, 在 DOG 尺度空间的 26 个邻域中检测出极值点。 $D(x, y, \sigma)$ 是相邻 2 个图像尺度之差, 计算公式为:

$$G(x, y, \sigma) = G(x, y, k\sigma) - G(x, y, \sigma) \quad (3)$$

如果一个点是它自身所在尺度的邻域 8 个点和上下层尺度的邻域 18 个点, 总计 26 个邻域点中的最大或者最小值, 则可以确定该点是该尺度下的一个极值点。

1.2.2 SIFT 的旋转不变

利用特征点邻域像素的梯度方向分布特征, 为每个特征点指定方向参数, 计算公式为:

$$m(x, y) = \sqrt{(L(x+1, y) - L(x-1, y))^2 + (L(x, y+1) - L(x, y-1))^2} \quad (4)$$

$$\theta(x, y) = \arctan\{[L(x, y+1) - L(x, y-1)] / [L(x+1, y) - L(x-1, y)]\} \quad (5)$$

式中: $m(x, y)$ 为点 (x, y) 处的梯度的模值; $\theta(x, y)$ 为点 (x, y) 处的梯度的方向; L 为关键点所在的尺度。

生成的 SIFT 特征向量, 会将坐标轴旋转到特征点的方向, 以此来保证旋转不变性。

1.3 离散小波变换

离散小波变换 (Discrete Wavelet Transform, DWT) 的优点是既考虑频率信息又考虑了位置的信息。将图片分解为 4 个不重叠的子带, 分别为 HH_1 , HL_1 , LH_1 , LL_1 , 之后再对 LL_1 进行分解, 得到分解结构见图 2^[12]。

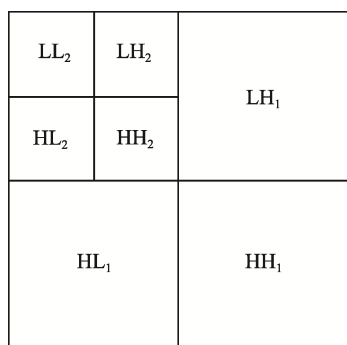


图 2 DWT 分解结构
Fig.2 DWT breakdown structure

一般来说, 低频子带 LL 集成了原始图像的大部分能量, 包括了原始图像的更多内容部分。将水印嵌入在这个部分, 会影响水印的不可见性, 但是会得到更好的鲁棒性。高频子带 HH 包括了原始图像大部分

的细节部分。一般来说将水印嵌入在这个部分, 会带来更好的不可见性, 但是鲁棒性相应地就会变弱一些, 因此一般将水印嵌入在低高频子带 LH 或者低高频子带 HL 之中^[13-14]。

1.4 奇异值分解

奇异值分解 (SVD) 将 1 个矩阵 A 分解为 3 个矩阵, 2 个正交矩阵 U 和 V , 1 个对角矩阵 S 。分解的方程为:

$$A = USV^T \quad (6)$$

式中: S 为奇异值系数矩阵, 以降序排列。奇异值相对比较稳定, 当适度的改变奇异值并不会影响原图像的质量, 而且当图像受到一定攻击的时候, 奇异值也不会发生较大的变化。奇异值分解在数字图像的领域受到了广泛的使用, 可以利用奇异值分解的稳定性, 提高嵌入水印的不可见性和鲁棒性^[15]。

2 水印方案

2.1 嵌入水印

文中提出的水印嵌入算法见图 3。

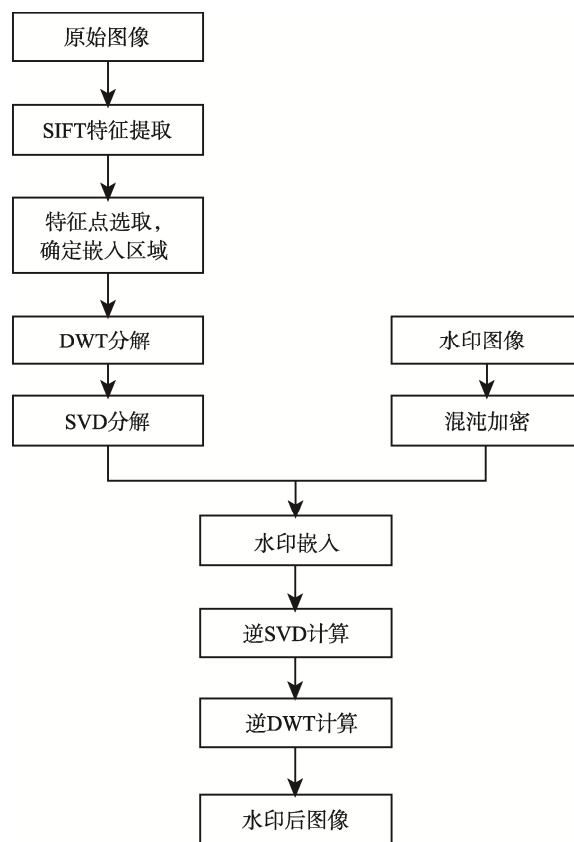


图 3 水印嵌入流程
Fig.3 Watermark embedding flow chart

1) 先将水印图像 $W(m, n)$ 进行预处理, 对原水印图像进行 logistic 混沌序列加密, 获得加密后的水印

图像 $W'(m,n)$ 。

2) 对原始的载体图像 $I(x,y)$ 进行 SIFT 变换提取图像的特征点, 并对所有的特征点进行 RANSAC 算法, 剔除误匹配, 获得鲁棒性更好的特征点。

3) 通过特征点的选取, 取距离最长的 2 个特征点的中心为圆心, 选取直径为 $2^k \geq W'_m$ 的区域作为嵌入的区域 I_{ROI} 。

4) 在嵌入时对选定的感兴趣区域 I_{ROI} 进行一级 DWT 后, 得到 HH_1, HL_1, LH_1, LL_1 这 4 个部分后, 再对 LL_1 做二级 DWT 变换, 得到 $HH_1, HL_1, LH_1, HH_2, HL_2, LH_2, LL_2$ 等 7 个子带, 并且做 $h \times h$ 分块。

5) 提取出 LH_2 子带, 将对该子带部分进行 SVD 分解, $L_2 = USV^T$ 获得该子带的奇异值矩阵 S 。

6) 对得到的奇异值进行水印的嵌入。采用加性嵌入水印, 得到的奇异值为:

$$S'(i, j) = S(i, j) + q \cdot W'(i, j) \quad (7)$$

式中: q 为嵌入强度; $S(i, j)$ 为 (i, j) 位置的奇异值。

7) 对嵌入水印后的子带进行重建。然后在进行逆 DWT 变换, 获得嵌入水印后的载体图像。

2.2 提取水印

文中提出的水印提取算法见图 4。

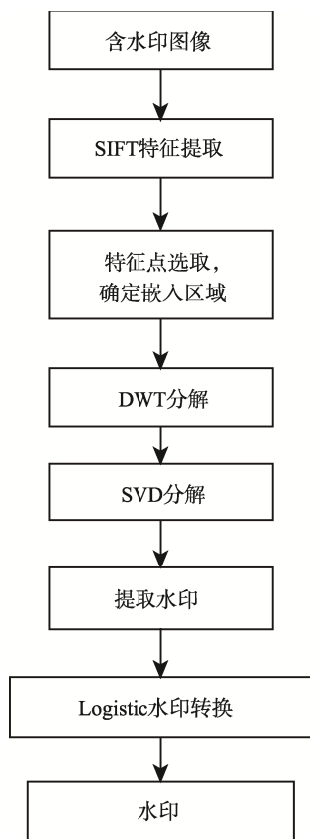


图 4 水印提取流程

Fig.4 Flow chart of watermark extraction

1) 对含水印图像 $I_w(x, y)$ 进行 SIFT 变换提取图像的特征点, 并且所有的特征点进行 RANSAC 算法剔除误匹配, 获得鲁棒性更好的特征点。

2) 通过特征点的选取, 取距离最长的 2 个特征点的中心为圆心, 选取直径为 $2^k \geq W'_m$ 的区域作为提取的区域 I_{ROI} 。

3) 在嵌入选定的感兴趣区域 I_{ROI} 进行一级 DWT 后, 得到 HH_1, HL_1, LH_1, LL_1 这 4 个部分后, 再对 LL_1 做二级 DWT 变换, 得到 $HH_1, HL_1, LH_1, HH_2, HL_2, LH_2, LL_2$ 等 7 个子带, 并且做 $h \times h$ 分块。

4) 提取出 LH_2 子带, 将对该子带部分进行 SVD 分解, $L_2 = U_w S_w V_w^T$ 获得该子带的奇异值矩阵 S_w 。

5) 通过提取到的奇异值 S_w , 获取到水印信息。

$$W'(i, j) = (S_w(i, j) - S'(i, j)) / q \quad (8)$$

对得到的水印系数 W' 进行 logistic 混沌序列逆运算, 将得到完整的水印。

3 实验结果及分析

3.1 实验设置

该部分将对文中提出的方法进行验证, 实验平台采用 Matlab 2019b, 对感兴趣区域水印嵌入后的不可见性, 以及该水印的鲁棒性进行实验。原始载体图像选用 1 幅尺寸为 512×512 的 BMP 灰度图像。水印图像的大小为 32×32 的“USST”的二值图像, 嵌入强度为 0.01。采用 Haar 正交小波来对原始图像进行离散小波分解。



图 5 实验原始图

Fig.5 Original figure of experiment

3.2 不可见性

不可见性是水印算法的一个重要的评价标准, 峰值信噪比 (PSNR) 和均方误差 (MSE) 是不可见性的重要表现指标。PSNR 的值越大, 该数字水印的算法不可见性越好^[16]。PSNR 的计算公式为:

$$P_{\text{PSNR}} = 10 \ln \frac{K_{\text{max}}^2}{L_{\text{MSE}}} \quad (9)$$

式中: $K_{\max}$ 为图像颜色的最大数值, 8 位采样点表示为 255。

MSE 计算公式为:

$$L_{\text{MSE}} = \frac{1}{m \times n} \sum_{k=0}^m \sum_{l=0}^n (I(k,l) - I_w(k,l))^2 \quad (10)$$

式中: m, n 为图像的长和宽; $I(k,l)$ 为原始图像的像素值; $I_w(k,l)$ 为嵌入水印后图像的像素值。在之前的研究表明, 嵌入强度 q 的不同对不可见性有非常大的影响^[9]。

原始载体图像和水印图像见图 5, 嵌入水印后的载体图像和水印图像见图 6, 对比可以看出含水印的图像和原始图像差别非常小, 且测得 PSNR 值为 46.7986, 说明该算法的不可见性较好。



a 含水印载体图像

b 水印图像

图 6 嵌入水印结果

Fig.6 Embedding watermark result figure



a 含水印载体图像

b 提取水印

图 7 实验结果

Fig.7 figure of experimental results

3.3 鲁棒性测试

NC 值 (归一化系数) 是数字水印算法的重要衡量标准, 鲁棒性测试则是指嵌入水印后的图像在遭受了不同的几何攻击后, 提取出的水印和原始水印的相似程度。NC 值的取值范围为 [0,1], NC 值越大, 该水印算法的鲁棒性越好^[17]。NC 值的计算公式为:

$$V_{\text{NC}} = \frac{\sum_{k=0}^m \sum_{l=1}^n I(k,l) * I_w(k,l)}{\sqrt{\sum_{k=0}^m \sum_{l=1}^n I^2(k,l)} \sqrt{\sum_{k=0}^m \sum_{l=1}^n I_w^2(k,l)}} \quad (11)$$

含有水印的图像, 在遭受到常规图像处理的攻击和几何攻击时, 提取出的水印的 NC 值见表 1。由表 1 可以看出, 该算法在抵抗旋转攻击时有较好的表现, 提取出的水印的准确率均可以保持 0.98 以上, 表明了该算法在抵抗旋转攻击时有非常好的鲁棒性。同时在面对常规的图像处理的攻击时, 也有不错的效果。

表 1 鲁棒性测试结果
Tab.1 Results of robustness test

攻击类型	提取的水印	NC 值
未攻击		1
均值滤波		0.9736
JPEG 压缩(Q=90)		0.9693
中值滤波(3×3)		0.9743
高斯噪声		0.9663
旋转 5°		1
旋转 10°		0.9987
旋转 30°		0.9921
旋转 45°		0.9878
旋转 60°		0.9842
剪切 1/16		0.9861

4 结语

文中提出的基于 SIFT 算法的自适应数字水印技术, 通过对图像特征的提取, 对图像特征点的筛选, 实现自适应水印区域选定, 再进行二级小波分解, 最后进行奇异值分解。在奇异值系数之中完成水印的嵌入。SIFT 的抗旋转性、尺度不变特性给水印带来了

很好的抗几何攻击的能力。为了验证算法的可行性,通过不可见性和鲁棒性的测试,可以看出该水印算法具有较好的抗干扰的能力。不难看出该算法具有非常好的性能,将 SIFT 变换算法与自适应水印技术相结合,具有非常高的创新型和实用价值,可以很好地起到保护数字产品的作用。

参考文献:

- [1] FITA A, ENDEBU B. Watermarking Colored Digital Image Using Singular Value Decomposition for Data Protection[J]. J Math Stat Anal, 2019, 1: 209.
- [2] EVSUTIN O, MELMAN A, MESHCHERYAKOV R. Digital Steganography and Watermarking for Digital Images: A Review of Current Research Directions[J]. IEEE Access, 2020, 8: 166589—166611.
- [3] HE Y, HU Y. A Proposed Digital Image Watermarking Based on DWT-DCT-SVD[C]// 2018 2nd IEEE Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC), Xi'an, 2018: 1214—1218.
- [4] ZEAR A, SINGH A K, KUMAR P. A Proposed Secure Multiple Watermarking Technique Based on DWT, DCT and SVD for Application in Medicine[J]. Multimedia Tools & Applications, 2016, 77: 4863—4882.
- [5] 郑秋梅, 曹宝琴, 张萌萌, 等. 基于 Harris 特征区域的 DC 系数自适应水印算法[J]. 计算机与数字工程, 2019, 47(11): 2884—2889.
ZHENG Qiu-mei, CAO Bao-qin, WANG Feng-hua, et al. DC Coefficient Adaptive Watermarking Algorithm Based on Harris Feature Region[J]. Computer and Digital Engineering, 2019, 47(11): 2884—2889
- [6] 李晓明, 郑链, 胡占义. 基于 SIFT 特征的遥感影像自动配准[J]. 遥感学报, 2006(6): 885—892.
LI Xiao-ming, ZHENG Lian, HU Zhan-yi. Automatic Registration of Remote Sensing Images Based on SIFT Features[J]. Journal of Remote sensing, 2006(6): 885—892.
- [7] FURQAN A, KUMAR M. Study and Analysis of Robust DWT-SVD Domain Based Digital Image Watermarking Technique Using MATLAB[C]// 2015 IEEE International Conference on Computational Intelligence & Communication Technology, 2015: 638—644.
- [8] 陈青, 李伟, 卜莹. 基于整数小波变换与矩阵分解的感兴趣区域可逆水印算法研究[J]. 包装工程, 2019, 40(5): 219—224.
CHEN Qing, LI Wei, BU Ying. Reversible Watermarking Algorithm for Region of Interest Based on Integer Wavelet Transform and Matrix Decomposition[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(21): 219—224.
- [9] NGUYEN T H, DUONG D M, DUONG D A. Robust and High Capacity Watermarking for Image Based on DWT-SVD[C]// The 2015 IEEE RIVF International Conference on Computing & Communication Technologies-Research, Innovation, and Vision for Future (RIVF), 2015: 83—88.
- [10] 陈青, 孙彦飞, 郭功勋. 基于 Harris 角点的抗几何攻击数字水印算法研究[J]. 包装工程, 2018, 39(13): 188—193.
CHEN Qing, SUN Yan-fei, GUO Gong-xun. Digital Watermarking Algorithm Resistant to Geometric Attacks Based on Harris Corner[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(13): 188—193.
- [11] BARNI M, BARTOLINI F, PIVA A. Improved Wavelet-Based Watermarking Through Pixel-Wise Masking[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, 10(5): 783—791.
- [12] BORRA S, THANKI R. A Frt-Svd Based Blind Medical Watermarking Technique for Telemedicine Applications[J]. International Journal of Digital Crime and Forensics (IJDCF), 2019, 11(2): 13—33.
- [13] SIKANDER B, ISHTIAQ M, JAFFAR M A, et al. Adaptive Digital Watermarking of Images Using Genetic Algorithm[C]// International Conference on Information Science & Applications, IEEE, 2010.
- [14] THODI D M, RODRIGUEZ J J. Expansion Embedding Techniques for Reversible Watermarking[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2007, 16(3): 721—730.
- [15] LIU Rui-zhen, TAN Tie-niu. An SVD-Based Watermarking Scheme for Protecting Rightful Ownership[J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2002, 4(1): 121—128.
- [16] 姚蕾, 王玲, 李燕. 基于 NSCT-SVD 的多重数字水印算法[J]. 计算机工程, 2014, 40(7): 106—109.
YAO Lei, WANG Ling, LI Yan. Multiple Digital Watermarking Algorithm Based on NSCT-SVD[J]. Computer Engineering, 2014, 40(7): 106—109.
- [17] 季诺然, 吕晓琪, 谷宇, 等. 基于 QR 码与混沌加密的 Contourlet 域彩色图像盲水印算法[J]. 包装工程, 2017, 38(15): 173—178.
JI Nuo-ran, LYU Xiao-qi, GU Yu, et al. Blind Color Image Watermarking Algorithm Based on QR Code and Chaotic Encryption in Contourlet Domain[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(15): 173—178.