

图文信息技术

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

陈青, 李伟, 卜莹

(上海理工大学, 上海 200125)

摘要: **目的** 针对传统感兴趣区域水印算法抵抗几何攻击能力较弱的缺陷, 提出一种基于 IWT-Schur 的感兴趣区域可逆水印算法。**方法** 首先对载体图像做小波变换, 筛选出各子带 ROI 系数, 接着采用 Arnold 变换加密水印图像, 加密水印图像做整数小波变换得到一系列分量。最后结合 Schur 分解, 将水印各分量对应加至载体各子带的 ROI。**结果** 采用整数小波变换 IWT 与矩阵 Schur 分解的嵌入方式, 使得含水印图像的视觉质量良好, 算法实现容易。含水印图像没有受到干扰时检测到的水印与原水印一致, 含水印图像受到攻击时, 也表现出良好的性能, 检测到的水印品质较好。**结论** 实验证明, 此方案水印提取正确, 且感兴趣区域无损恢复。

关键词: 感兴趣区域; 可逆水印; 整数小波变换; Schur 分解

中图分类号: TS206 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2019)05-0219-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.05.031

Algorithms of Digital Watermarking in Region of Interest Based on Integer Wavelet Transform and Matrix Decomposition

CHEN Qing, LI Wei, BU Ying

(University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200215, China)

ABSTRACT: The work aims to propose a reversible watermarking algorithm of region of interest based on IWT-Schur for the shortcomings of the watermarking algorithm in traditional region of interest against geometric attack. Firstly, the carrier image was wavelet transformed, and the sub-band ROI coefficients were filtered out. Then, the Arnold transform was used to encrypt the watermark image, and the encrypted watermark image was used as an integer wavelet transform to obtain a series of components. Finally, combined with the Schur decomposition, the components of the watermark were correspondingly added to the ROI of each sub-band of the carrier. The embedded wavelet transform and the Schur decomposition of the matrix made the water-printed image have good visual quality and the algorithm was easy to implement. The watermark detected when the watermarked image was not disturbed was consistent with the original watermark. When the watermarked image was attacked, it also showed good performance, and the quality of detected watermark was good. Experiments show that the watermark extraction is correct and the region of interest is not restored.

KEY WORDS: region of interest; reversible watermark; integer wavelet transform; Schur decomposition

收稿日期: 2018-10-29

基金项目: 国家 863 计划基金 (2012AA050206); 上海自然科学基金 (12ZR1420800); 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。

随着数字多媒体技术发展, JPEG2000 压缩标准应运而生, 性能更优越。JPEG2000 标准是应满足压缩图像应用需求而出现, 拥有 JPEG 压缩^[1-3]不可比拟的性能, 它基于小波变换, 其核心是最优截断的嵌入式块编码 (Embedded Block Coding With Optimized Truncation, EBCOT), 支持无损和有损压缩^[4]。JPEG2000 支持感兴趣区域编码^[5-7], 即支持图像各部分的编码精度不等。另外, 性能上还拥有很多优势: ROI 编码, JPEG2000 支持同一图像中不同区域具有不同编码精度; 渐进传输, 包含分辨率、质量、空间位置和分量四方面; 随机处理图像某区域, 无需对全部码流都进行解码; 具有较好的容错性。由于拥有高效的压缩性能与优秀特性, JPEG2000 应用领域逐渐拓展。

关于感兴趣区域图像水印技术, 基本要求是提取出水印后感兴趣区域数据必须无损恢复^[8-11]。其中大部分算法是通过改变小波系数来嵌入水印, Fan^[12]等分别在 ROI 与背景区域 (Region of Background, ROB) 以 2 种方式添加水印序列, 最后以均值的形式提取水印信息, 但此算法的嵌入位置选在了最优截断嵌入式块编码模块, 水印模块很容易影响到 JPEG2000 正常编解码过程, 且嵌入代价较大。Rayachoti^[13]等设计了一种基于整数小波变换 (Integer Wavelet Transform, IWT) 的医学图像水印方案, 把患者的健康记录数据等作为水印嵌入到感兴趣区域中, 此方案能够准确地检测和定位 ROI 内的篡改区域, 并完全恢复出原始的 ROI, 但这种水印算法只是针对医学图像, 并不适用于 JPEG2000 图像。林建忠^[14]利用 Harris-Laplace 算子检测特征点并构造、筛选感兴趣区域, 接着采用基于点扩散的块截断编码技术提取 ROI 特征, ROI 特征和水印合并生成密钥, 实现零水印。实验表明该方法能够有效保护图像的 ROI 数据且可以提高鲁棒性, 但是此方案受裁切处理影响较大。针对以上问题, 文中提出一种基于 IWT-Schur 的感兴趣区域可逆水印算法, 采用将水印各子带对应嵌入到载体图像各子带的嵌入方式, 确保了水印完整嵌入至整个感兴趣区域内, 更好地与 ROI 编码特性相适应。

1 相关理论

1.1 整数小波变换

目前大多数数字水印算法均以传统小波变换为基础, 然而传统 DWT 具有复杂度较大、浮点数取整有误差等不足。整数小波变换是传统小波变换的一个扩展, 由于图像的像素值均为整数形式, 消除了传统小波变换中浮点数取整误差, 采用整数小波变换, 可大幅度简化计算复杂度, 在图像处理方面拥有更大优势。另外, IWT 完全可逆, 能够无损处理图像。IWT

具体过程如下^[15]所述。

1) 分解。将输入数据 $S_i(n)$, $n \in Z$ 分成不相关序列: 奇数序列 $x_o(n)$, 偶数序列 $x_e(n)$, 其表达式为:

$$x_e(n) = S_j(2n) \quad (1)$$

$$x_o(n) = S_j(2n+1) \quad (2)$$

2) 预测。按照原始数据间的相关性, 使用 $x_e(n)$ 的预测值预测 $x_o(n)$, 预测误差为 $x_o(n)$ 的预测值和实际值的差, 公式为:

$$d_j(n) = x_o(n) - P[x_e(n)] \quad (3)$$

式中: $d_j(n)$ 为预测误差; $P[\]$ 为预测算子。由于 $d_j(n)$ 包含的信息少于 $x_o(n)$, 则可用 $d_j(n)$ 替代 $x_o(n)$ 。

3) 更新。利用算子 $U[\]$ 得到预测误差 $d_j(n)$, 更新 $x_e(n)$:

$$S_j(n) = x_e(n) + U[d_j(n)] \quad (4)$$

式中: $d_j(n)$ 为信号的高频部分; $U[\]$ 为更新算子。在一次整数小波变换后, 偶数序列 $x_e(n)$ 作为低频部分, 奇数序列 $x_o(n)$ 作为高频部分, 低频部分能够继续执行上述分解、预测、更新等 3 个步骤进行下一次的变换。

2 水印算法

2.1 水印嵌入算法

1) 水印图像预处理^[16-17]。原始水印 W 使用 Arnold 置乱 m 次, 得到预处理后的水印图像 W' 。二维 Arnold 变换可写为:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \pmod{N} \quad (5)$$

式中: (x, y) 为原图数据; (x', y') 为置乱图像数据, N 为图像矩阵的阶数。

2) 将水印图像 W' 先做一级 IWT, 得到 LL, HL, LH, HH 4 个部分, 再对 LL 做二级 IWT, 得到 LL2, LH2, HL2, HH2, LH1, HL1, HH1 这 7 个子带。

3) 从原始载体中手动选取半径为 r 的圆形 ROI。

4) 载体两级 DWT 后, 筛选出各分量中 ROI, 并做 $h \times h$ 分块。

5) 将水印图像的 LL2, LH2, HL2, HH2, LH1, HL1, HH1 这 7 个子带对应嵌入到载体图像 LL2, LH2, HL2, HH2, LH1, HL1, HH1 子带的感兴趣区域中。

6) 各子块分别做 Schur 分解 $U^H A U = T$, 得到上三角矩阵 T , 找到每个 T 的最大值元素 T_{\max} 及其坐标 (i, j) 。按照式 (6) 将水印嵌入至最大值元素 T_{\max} 中。

$$T_{\max} = \begin{cases} T_{\max} - \text{mod}(T_{\max}, q) + \alpha \times q & w = 1 \\ T_{\max} - \text{mod}(T_{\max}, q) + (1 - \alpha) \times q & w = 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中: q 为水印嵌入强度; α 为水印嵌入系数。将 T_{\max} 放回矩阵 T 做重构, 生成含水印图像。

2.2 水印提取算法

1) 含水印图像做两级 DWT 后，筛选出 ROI 做 $h \times h$ 分块。

2) 类似于嵌入算法，每个 $h \times h$ 分块进行 Schur 分解 T ，得到上三角矩阵 T_1 。

3) 根据嵌入算法中的最大值元素 T_{max} 的坐标 (i, j) 找到矩阵 T_1 中坐标为 (i, j) 的元素 $T_1(i, j)$ ，结合水印嵌入强度 q ，水印嵌入系数 α ，按照式 (7) 提取出各子带水印数据。

$$w = \begin{cases} 0 & \text{mod}(T_1(i, j), q) < q/2 \\ 1 & \text{mod}(T_1(i, j), q) \geq q/2 \end{cases} \quad (7)$$

4) 提取到的水印信息做整数小波逆变换。

5) 上一步得到的水印依据 Arnold 置乱次数解密，重构出完整水印。

3 实验结果及分析

3.1 实验设置

实验平台采用 Matlab2017b，进行不可见性、感兴趣区域可逆性和鲁棒性测试实验。原始图像采用 4 幅尺寸 512×512 的 BMP 灰度图像，Lena，Baboon，Goldhill，Girl 见图 1。半径为 128 的圆形 ROI，见图 2。对于 LL2，LH2，HL2，HH2 子带 $h \times h$ 分块为 4×4，LH1，HL1，HH1 的 $h \times h$ 分块为 8×8，水印嵌入强度 q 可设范围为 2~10，Arnold 置乱次数为 5。

3.2 不可见性测试

设置水印嵌入强度 $q=2$ ，分别向 4 幅载体嵌入水印信息，结果见图 3，其峰值性噪比分别为 38.73，

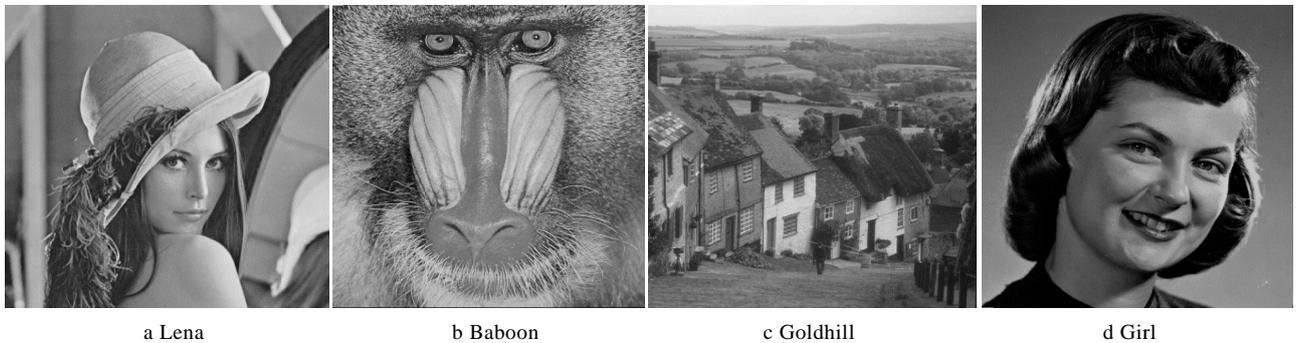


图 1 原始载体图像
Fig.1 Original carrier image

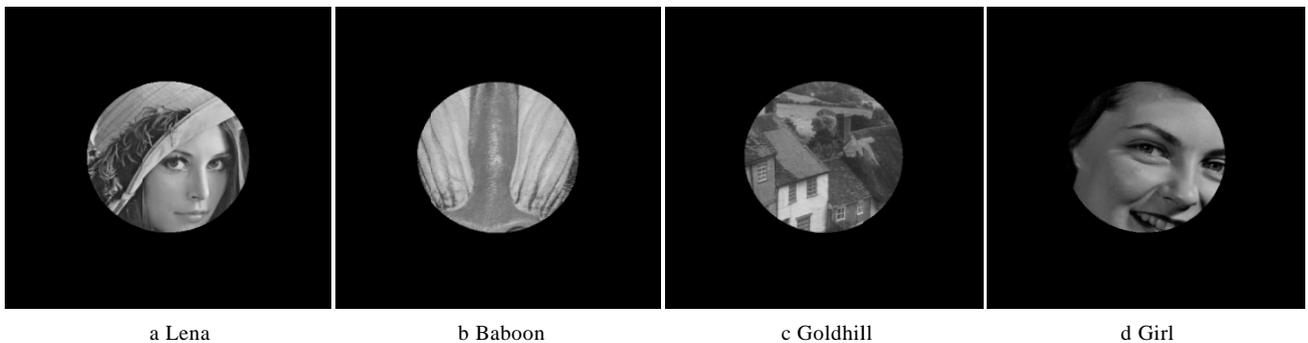


图 2 载体图像感兴趣区域
Fig.2 Region of interest of carrier image

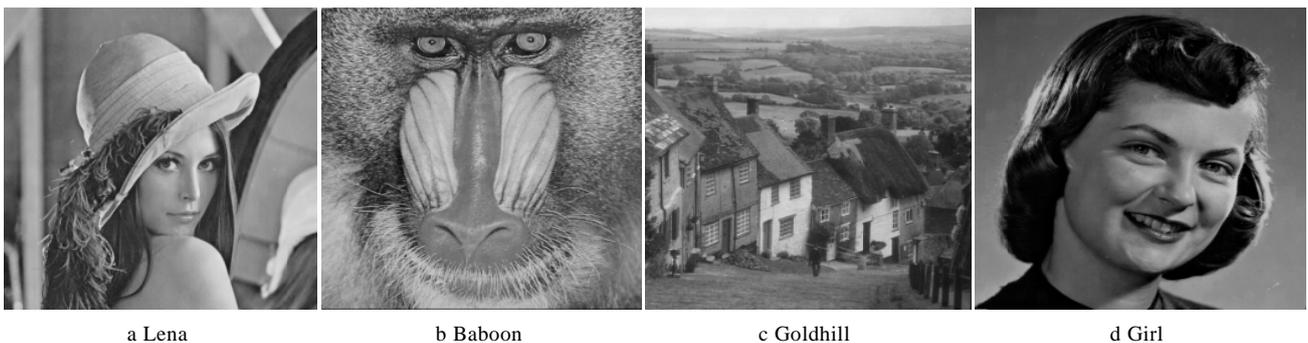


图 3 嵌入水印后的图像
Fig.3 Watermarked image

40.65, 41.73, 39.19。其中, 嵌入的水印为尺寸 32×32 的灰度图像“USST”, 见图 4a。含水印图和原始图相比, 图像质量几乎无差别, 即水印算法具有良好的不可见性。无攻击时, NC=1, 能完整地提取到水印, 见图 4b。

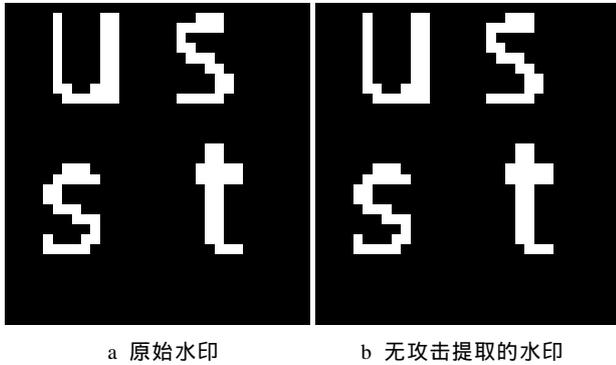


图 4 原始水印与无攻击时提取的水印对比
Fig.4 Comparison of original watermark and watermark extracted without attack

水印不可见性、鲁棒性不可兼得, 故应寻找最佳嵌入强度, 取得二者绝佳平衡。未受攻击时, 调整嵌入强度 q , 测试 4 幅图像的不可见性, 验证嵌入强度与不可见性的关系。4 幅测试图像在多个嵌入强度下相应的 PSNR 值见表 1。为更直观地展示两者关系, 将表 1 数据绘制成图 5。由图 5 可知, 随着 q 增大, PSNR 逐渐减小, 故可以按照算法要求, 选择最佳嵌入强度 q 。

表 1 不同嵌入强度下对应的 PSNR
Tab.1 Corresponding PSNR at different embedding intensities

图像	强度 q									
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Lena	38.73	38.87	37.83	37.56	36.81	36.41	36.03	35.42	35.03	
Baboon	40.65	40.41	39.72	39.07	38.15	37.35	36.76	36.03	35.24	
Goldhill	41.73	41.47	40.63	39.85	39.39	38.54	37.63	37.12	36.43	
Girl	39.19	38.68	38.29	37.56	37.12	36.74	36.25	35.63	35.13	

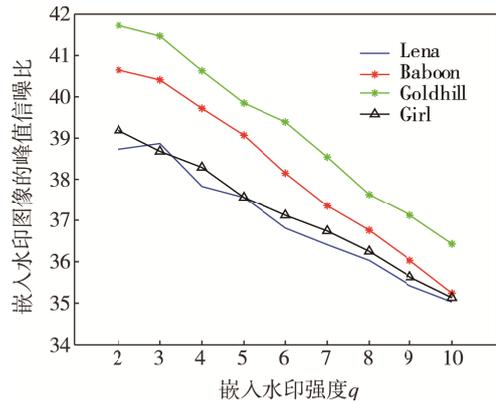


图 5 水印嵌入强度 q 与不可见性的关系
Fig.5 Relationship between watermark embedding strength q and invisibility

结合表 1 和图 5 可知, 测试图像嵌入水印后的 PSNR 与嵌入强度 q 密切相关。当 q 为 2~10 时, 随着 q 的增大 PSNR 却不断变小, 但仍在 35 以上。含水印图视觉质量无明显失真, 不可见性处于最佳状态。为取得水印不可见性、鲁棒性二者绝佳平衡, 综合两者考虑, 寻找的最佳嵌入强度 q 应为 2。

3.3 感兴趣区域可逆性测试

对 4 幅测试图像分别嵌入水印信息, 此时 PSNR 分别为 40.15, 39.61, 40.52, 38.81。未受攻击时, 进行水印提取并重构图像, 结果见图 6a—d。计算重构的载体与原始载体的差值, 检验感兴趣区域能否完整恢复, 实验结果见图 7a—d。



图 6 重构以后的图像
Fig.6 Reconstructed image

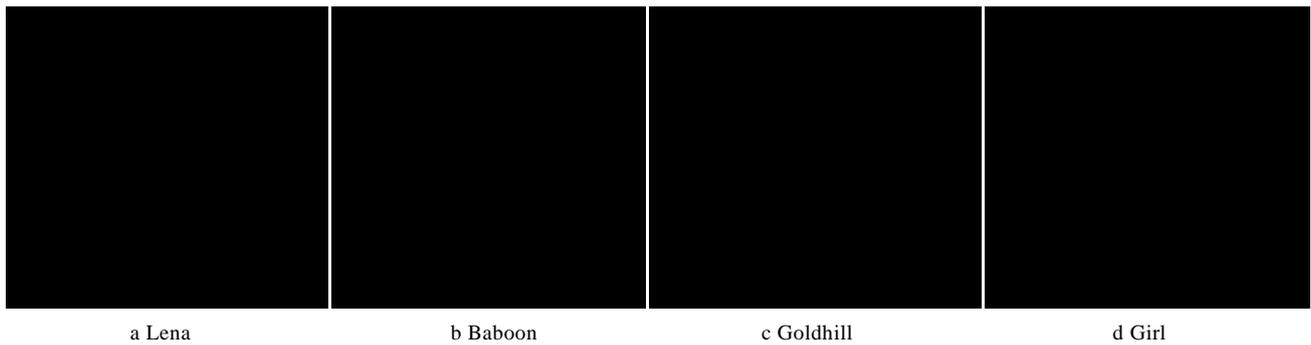


图 7 差值图像
Fig.7 Difference map

由图 7 中 a—d 可知，差值图像的感兴趣区域数据全为 0，视觉上为全黑，即表明该算法能够保证提取出水印后无损恢复感兴趣区域。

3.4 鲁棒性测试

设置水印嵌入强度 $q=2$ ，对含水印 Lena 图像分别做攻击处理，鲁棒性实验结果见表 2。

压缩比即原图像数据量与压缩后的图像数据量的比值。图像压缩最先影响的是图像的高频分量，压缩比越小，图像丢失的高频分量越少，从高频分量中提取的水印信息则越完整。结合表 2 可知，JPEG2000 压缩对提取出的水印有一定程度的影响。随着压缩比增大，提取出的水印质量变差，但提取出的水印信息仍然比较完整，NC 值均在 0.8 以上，从主观评价和客观评价都能表明，该算法对 JPEG2000 压缩有较强的鲁棒性。

由 2 表可知，2 组实验滤波模板分别是 3×3 、 5×5 ，随着模板尺寸增加，NC 值逐渐减小但仍在 0.8657 以

上，提取出的水印清晰可见。滤波处理对水印影响不大，即水印可以抵抗滤波攻击。

3 组实验噪声方差依次为 0.01, 0.02, 0.03。由表 2 可知，噪声对提取出的水印有轻度干扰。加入的噪声较小时检测到的水印视觉效果较好，当噪声强度不断增大时，检测到的水印品质变差，但 NC 值均大于 0.8317，即算法一定程度上可以抵抗噪声攻击。

剪切处理会造成含水印图像信息缺失，只能检测出部分水印。将嵌入水印后的图像左上角（可为任意位置）剪切 1/16 大小的区域，测试算法的鲁棒性。由表 2 可知，剪切攻击对提取出的水印图像有一定影响，但是含水印图像裁切 1/16 时，NC=0.9292，提取的水印较清晰，即此算法能抵抗剪切处理。

综上，表明算法可以抵抗常见攻击，JPEG2000 压缩影响水印较小；压缩比为 80 时，提取出水印 NC=0.8646。另外，经过滤波、噪声、剪切等处理后亦能提取出水印，即此方案对于通用信号攻击都有很好的鲁棒性，能满足感兴趣区域水印的要求。

表 2 常规信号处理攻击实验结果
Tab.1 Conventional signal processing attack experiment results

攻击类型	提取的水印	NC	攻击类型	提取的水印	NC
未受攻击		1.000	椒盐噪声方差0.01		0.9915
JPEG2000压缩比20		1.000	椒盐噪声方差0.02		0.9823
JPEG2000压缩比50		1.000	椒盐噪声方差0.03		0.8317
JPEG2000压缩比70		0.9831	高斯噪声方差0.01		0.9715
JPEG2000压缩比80		0.8646	高斯噪声方差0.02		0.9423
中值滤波3×3		0.9676	高斯噪声方差0.03		0.8817
中值滤波5×5		0.8657	旋转10°		0.8394
高斯滤波3×3		0.9912	旋转30°		0.7795
高斯滤波5×5		0.9381	剪切攻击1/16		0.9292

4 结语

文中介绍了基于 IWT-Schur 感兴趣区域可逆水印算法。首先,载体图像做两级 DWT,筛选出各子带中 ROI;然后,采用 Arnold 变换加密水印图像,并采用整数小波变换对水印进行分解;最后,结合矩阵 Schur 分解,把水印各子带对应嵌至载体各子带的感兴趣区域。

不可见性实验和鲁棒性实验表明,整数小波变换与矩阵 Schur 分解的嵌入方式,使得含水印图像视觉质量良好,算法实现容易。含水印图像没有受到干扰时检测到的水印与原水印一致,含水印图像受到攻击时,也表现了良好性能,检测到的水印品质较好。

参考文献:

- [1] EDMUNDSON D, SCHAEFER G. An Overview and Evaluation of JPEG Compressed Domain Retrieval Techniques[C]// ELMAR, 2012 Proceedings IEEE, 2012: 75—78.
- [2] PENNERBAKER W B, MITCHELL J L. JPEG Still Image Data Compression Standard [M]. Van Nostrand Reinhold, 1992.
- [3] NOGUCHI Y, KOBAYASHI H, KIYA H. A Method of Extracting Embedded Binary Data from JPEG Bitstreams Using Standard JPEG Decoder[C]// International Conference on Image Processing, Proceedings, IEEE, 2000, 1: 577—580.
- [4] SUBRAMANYAM A V, EMMANUEL S, KANKANHALLI M S. Robust Watermarking of Compressed and Encrypted JPEG2000 Images[J]. International Journal of Computer Trends & Technology, 2013, 4(6): 703—716.
- [5] CHRISTOPOULOS C, SKODRAS A, EBRAHIMI T. The JPEG2000 Still Image Coding System: an Overview[J]. Consumer Electronics IEEE Transactions on, 2000, 46(4): 1103—1127.
- [6] GUPTA R, JAIN S. A Review on Watermarking Techniques for Compressed Encrypted Images[C]// International Conference on Medical Imaging, M-Health and Emerging Communication Systems, IEEE, 2015: 10—13.
- [7] DHIMAN V, KHANDNOR P. Watermarking Schemes for Secure Data Aggregation in Wireless Sensor Networks: A Review Paper[C]// International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques, IEEE, 2016.
- [8] THAMPY S M, JOHNY A, KIZHAKKETHOTTAM J. Review on Robust Watermarking of Compressed and Encrypted JPEG2000 Images[C]// International Conference on Soft-Computing and Networks Security IEEE, 2015: 1—3.
- [9] SIDDIQUI A, KAUR A. A Secure and Robust Image Watermarking System Using Wavelet Domain[C]// International Conference on Cloud Computing, Data Science & Engineering-Confluence IEEE, 2017: 599—604.
- [10] GUPTA R, JAIN S. A Review on Watermarking Techniques for Compressed Encrypted Images[C]// International Conference on Medical Imaging, M-Health and Emerging Communication Systems, IEEE, 2015: 10—13.
- [11] DEEPA S, SANDEEP A. ROI Lossless Colored Medical Image Watermarking Scheme with Secure Embedding of Patient Data[C]// International Conference on Communication Systems and Networks IEEE, 2017: 103—106.
- [12] FAN Y C, CHIANG A, SHEN J H. ROI-based Watermarking Scheme for JPEG 2000[J]. Circuits Systems & Signal Processing, 2008, 27(5): 763—774.
- [13] RAYACHOTI E, EDARA S R. A Novel Medical Image Watermarking Technique for Detecting Tamper Inside ROI and Recovering Original ROI[C]// IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology, IEEE, 2014: 321—326.
- [14] 林建忠. 面向数字信息安全的可逆水印方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2017.
LIN Jian-zhong. Research on Reversible Watermarking Method for Digital Information Security[D]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology, 2017.
- [15] AGRWAL S L, YADAV A, KUMAR U. Improved Invisible Watermarking Technique Using IWT-DCT[C]// International Conference on Reliability, INFOCOM Technologies and Optimization, IEEE, 2016: 283—285.
- [16] 陈青, 姚绍华, 陈祥. 基于 SURF 的 NSCT 域抗几何攻击水印算法[J]. 包装工程, 2018, 39(1): 162—167.
CHEN Qing, YAO Shao-hua, CHEN Xiang. SURF-based NSCT Domain Anti-geometric Attack Watermarking Algorithm[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(1): 162—167.
- [17] 陈青, 王飞. 基于 SIFT 的 NSCT 域抗几何攻击水印算法[J]. 包装工程, 2017, 38(5): 178—182.
CHEN Qing, WANG Fei. SIFT-based NSCT Domain Anti-geometric Attack Watermarking Algorithm[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(5): 178—182.