

基于 QR 码和 DWT-SVD 分解的双水印算法

栾炜, 曹建农

(长安大学, 西安 710054)

摘要: **目的** 为了进一步提高水印的鲁棒性和保护性, 文中提出一种基于 QR 码和 DWT-SVD 分解的双重水印方案。**方法** 将次级水印的奇异值嵌入主水印经一级离散小波变换后低频系数的奇异值中, 再将含有次级水印信息的主水印奇异值嵌入主图像的二级小波变换后低频系数的奇异值中。**结果** 经仿真实验发现, 文中算法的主水印和次级水印 PSNR 值可达 66 dB 和 60 dB, 并对于高斯噪声、JPEG 压缩、JPEG2000 压缩、旋转攻击、对比度增强以及缩放攻击有一定的鲁棒性, 攻击后提取的水印相关系数接近于 1。**结论** 算法属于非盲水印, 在多种攻击情况下都能检测到次要水印, 但有时候主水印会严重失真。

关键词: QR 码; 离散小波变换; 奇异值分解; 双数字水印

中图分类号: TP317.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)19-0197-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.19.034

Dual Watermarking Algorithm Based on QR Code and DWT-SVD Decomposition

LUAN Wei, CAO Jian-nong

(Chang'an University, Xi'an 710054, China)

ABSTRACT: The work aims to propose a dual watermarking algorithm based on QR code and DWT-SVD decomposition to further improve the robustness and safety of watermark. The singular value of the secondary watermark was embedded into the singular value of the low-frequency coefficient of the primary watermark after the first-order discrete wavelet transform and then the primary watermark singular value containing the secondary watermark information was embedded into the singular value of the low frequency coefficient after the second wavelet transform of the main image. Through the simulation experiment, the PSNR values of primary watermark and secondary watermark by the proposed algorithm were respectively 66 dB and 60 dB. The proposed algorithm was robust to Gaussian noise, JPEG compression, JPEG2000 compression, rotation attack, contrast enhancement and scaling attacks. The relevant watermark coefficient extracted after attack was close to 1. The algorithm is a non-blind watermark. The secondary watermarks can be detected under various attack conditions, but sometimes the primary watermark maybe seriously distorted.

KEY WORDS: QR Code; discrete wavelet transform; singular value decomposition; dual watermarking

近年来,随着图像编辑软件的发展和互联网的普及,数字媒体的修改、伪造等非法操作变得简单和难以预防,数字化媒体的知识产权保护已成为当务之急,通过对数字媒体加入水印,可实现对非法传播图像及影视作品的追踪功能。水印可分为空域水印和频域水印,还可分为盲水印和非盲水印。频域水印相对于空域水印有着更好的性能,盲水印因其提取条件简

单而倍受重视^[1]。随着技术的发展,基于离散余弦变换^[2]、离散小波变换^[3-4]、轮廓波分解^[5]、非下采样轮廓波分解^[6],以及奇异值分解^[7-8]等技术在水印研究中得到了广泛的应用。这些水印大部分均为单一水印算法,随着二维码技术引入水印研究领域,不仅提高了水印对几何攻击的鲁棒性,还增加了水印信息的容量,而对数极坐标变换将缩放攻击转换为平移攻

收稿日期: 2018-06-14

基金项目: 2015 年国家自然科学基金(4157010958); 2015 年中央高校智库项目(310823151007)

作者简介: 栾炜(1976—),男,长安大学博士生,主要研究方向为数字水印。

通信作者: 曹建农(1963—),男,长安大学教授、博导,主要研究方向为数字图像处理。

击,提高了水印算法的鲁棒性^[9-10]。为了进一步提高水印的鲁棒性和保护性,Swanson等提出了双重水印的概念^[11],使得水印在安全应用上又有了一定的增强^[12-15]。这些双重水印均以灰度图像为研究对象,水印信息量较小,文中结合QR码来实现双重水印的算法,不仅保留了算法较高的鲁棒性,同时还增加了水印的信息量。

1 基本理论

1.1 离散小波变换

离散小波变换(DWT)是一种对连续小波变换的尺度、位移按照2的幂次进行离散化处理,数字图像可以看作是离散的信号,因此,小波变换在图像分析与处理中被广泛采用。图像经小波分解后实现了将信号由空间域转换到频率域的转换,再进行分析、压缩和传输会更有效率。小波变换更符合HVS(human visual system)特性,非常有利于数字水印的不可见性应用。图像经过一级DWT变换后可以分解为4个子带,其中低频子带(LL)包含了原图像的主要信息,其他3个高频子带(HL, LH, HH)则分别包含水平、垂直、对角线等细节信息。小波多级分解是对上一级低频子带进行了再次分解。小波变换分解见图1。

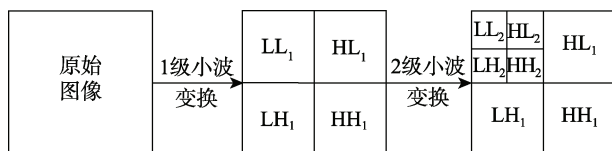


图1 离散小波变换

Fig.1 Discrete wavelet transform

1.2 奇异值分解

奇异值分解(SVD)是一种将矩阵对角化的数值算法,它是一种非线性滤波。从矩阵的角度看,它是将包含信号信息的矩阵分解到一系列奇异值和奇异值矢量对应的时频子空间中,由于图像可以看成非负矩阵,图像的奇异值分解就是矩阵对角化的数值算法。在图像处理中,图像的奇异值不会因图像旋、缩放、转置而有很大的变化,稳定性非常好,适用于数字水印中的攻击不变性。

奇异值分解是一种将矩阵对角化的正交变换,其定义如下所述。

设 $A \in R^{m \times n}$, 存在正交矩阵:

$$\begin{cases} U = (u_1, u_2, \dots, u_m) \in R^{m \times m} \\ V = (v_1, v_2, \dots, v_n) \in R^{n \times n} \end{cases} \quad (1)$$

使得:

$$S = U^T A V = \text{diag}(\delta_1, \delta_2, \delta_3, \dots, \delta_p) \quad (2)$$

式中: $p = \min\{m, n\}; \delta_1 \geq \delta_2 \geq \delta_3 \geq \dots \geq \delta_p \geq 0$, δ_i 称为 A 的奇异值; u_i, v_i 称为 δ_i 的左右奇异向量。

由于 U 和 V 都是正交矩阵, 所以:

$$A = U S V^T = \sum_{i=1}^N \delta_i u_i v_i^T \quad (3)$$

$A v_i = \delta_i u_i, A u_i = \delta_i v_i, (i=1, 2, 3, \dots, p)$, u 和 v 的列分别为 $A A^T$ 和 $A^T A$ 的特征向量, $A = U S V^T$ 称为 A 的奇异值分解式(SVD)。

1.3 QR码

QR码(Quick Response Code)是一种二维码,利用了Reed-Solomon(RS)纠错算法,使其存储的信息不受旋转、缩放、轻微变形、部分缺失而影响读取。QR码存储的信息量大、纠错能力强,可转化为二值图像等性质,使得QR码适合作为数字水印进行版权信息存储,并嵌入到主图像中去,QR码结构见图2。

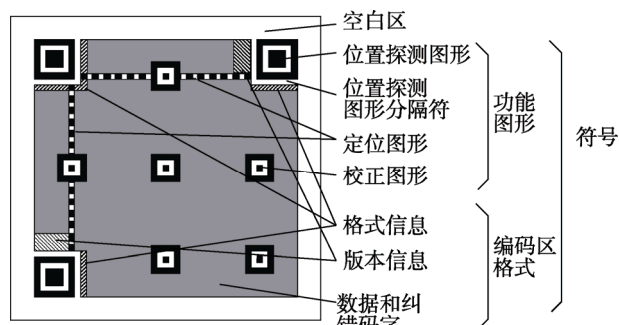


图2 QR二维码结构

Fig.2 Structure of QR code

2 水印嵌入与提取算法

文中实现了一种双重水印方法,通过QR码、DWT和SVD来开发算法。该方案继承了DWT和SVD的优点,即鲁棒性和不可见性,同时利用QR码增加了主水印容量。其中 I 为主图像, W_1 和 W_2 分别为次级水印和主水印,主图像是 $8M \times 8M$ 的灰度图像,主水印是 $2M \times 2M$ 的QR码图像,次级水印是 $M \times M$ 的灰度有意义的标识。算法通过将次级水印嵌入到主水印中,得到的含次级水印的主水印作为主图像的水印。主水印与次级水印嵌入流程见图3。

2.1 水印嵌入算法

2.1.1 次级水印嵌入流程

1) 对 $M \times M$ 大小的次级水印 W_1 进行奇异值分解。

2) 对 $2M \times 2M$ 大小的QR码进行一级小波变换,并对低频子带进行SVD分解。

3) 将次级水印成的奇异值 S_1 加乘到主水印一级小波分解的奇异值 S_2 中,即 $S' = S_2 + \alpha \times S_1$, 其中 α 为水印嵌入强度系数。

4) 利用 S' 对主水印 QR 码一级小波分解的低频子带进行奇异值重构。

5) 对主水印 QR 码进行一级小波逆变换, 得到水印图像 W_3 。

2.1.2 主水印嵌入流程

- 1) 对水印图像 W_3 进行奇异值分解。
- 2) 对 $8M \times 8M$ 大小的主图像 I 进行二级小波变换,

并对低频子带进行奇异值分解。

3) 将水印图像 W_3 的奇异值加乘到主水印二级小波变换的低频子带奇异值中, 即 $S'' = S_4 + \beta S_3$, 其中 β 为水印嵌入强度。

4) 对主图像的二级小波变换低频子带进行奇异值重构, 利用重构结果对主图像进行二级小波逆变换, 得到含水印图像 I' 。

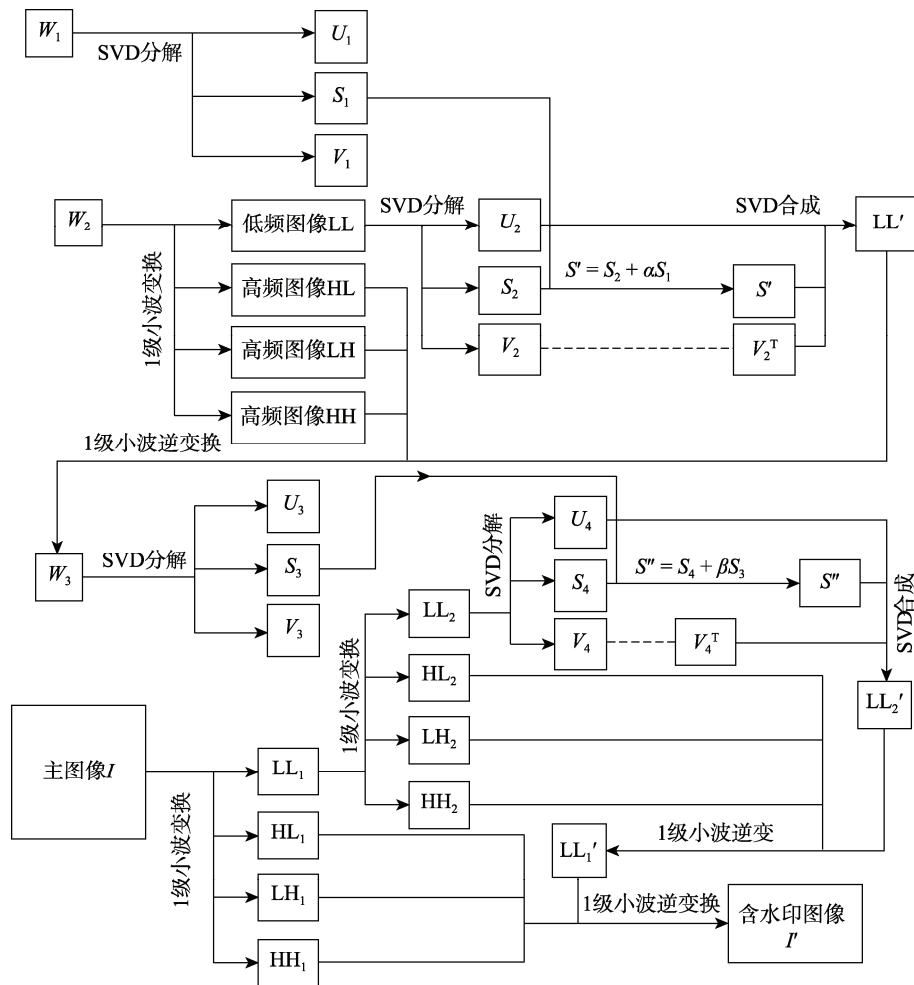


图 3 数字水印嵌入流程

Fig.3 Flow chart to embed digital watermark

2.2 水印提取算法

水印提取的目的是获得水印的估计。用于从水印图像中提取水印的信息包括主水印和次级。主水印和次级水印提取过程见图 4。

2.2.1 主水印提取流程

1) 对含水印图像 I' 进行二级小波分解, 并对低频子带进行奇异值分解得到 S_5 。

2) 利用水印嵌入时的奇异值 S_4 和公式 $S_5' = (S_5 - S_4) / \beta$ 得到主水印奇异值对角矩阵。

3) 对主水印进行奇异值重构。

2.2.2 次级水印提取流程

1) 对提取的水印图像 W_3' 进行一级小波变换, 并对低频子带进行奇异值分解。

2) 用水印嵌入时奇异值 S_2 和公式 $S_6' = (S_6 - S_2) / \alpha$ 得到次级水印对角矩阵 S_6' 。

3) 对次级水印进行奇异值重构。

3 仿真结果与分析

文中算法通过 Matlab R2015b 64 位版本实现, 使用大小为 256×256 的灰度图像 Lena 作为主图像, 主

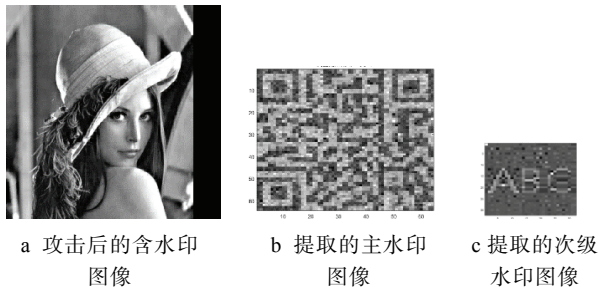


图 7 剪切攻击 (剪切 10%)
Fig.7 Shear attack (cut 10%)

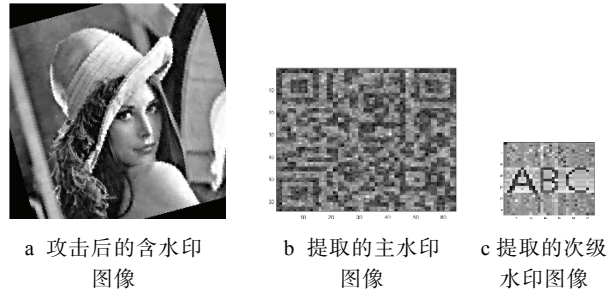


图 8 旋转攻击 (旋转 15°)
Fig.8 Rotation attack (rotated for 15 degrees)



图 9 JPEG 压缩攻击 (40 : 1)
Fig.9 JPEG compression attack (40 : 1)



图 10 JPEG2000 压缩攻击 (40 : 1)
Fig.10 JPEG2000 compression attack (40 : 1)



图 11 高斯噪声攻击 (0.05 高斯噪声)
Fig.11 Gaussian noise attack

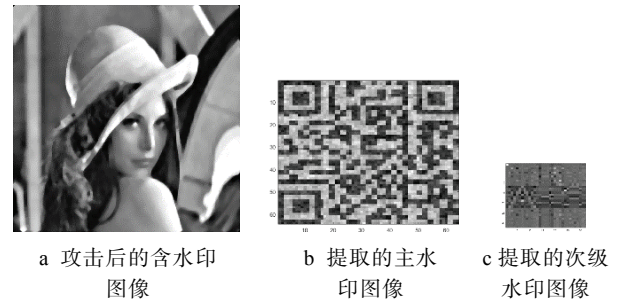


图 12 中值滤波攻击 (5×5 窗)
Fig.12 Median filtering attack (5×5 window)

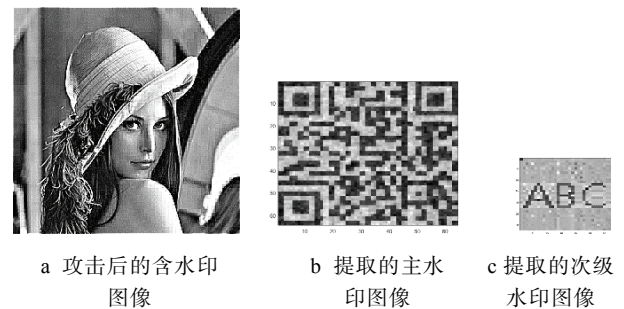


图 13 对比度增强攻击 (10%)
Fig.13 Contrast enhancement attack (10%)



图 14 缩放攻击 (缩小 50%)
Fig.14 Scaling attack (50% shrinkage)

为了验证水印的存在,可以使用不同的度量来显示原始和提取的奇异值之间的相似度。在提出的算法中,相关系数由式(4)给出。

$$\rho(\omega, \bar{\omega}) = \frac{\sum_{i=1}^r \omega(i) \bar{\omega}(i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^r \bar{\omega}^2(i)} \sqrt{\sum_{i=1}^r \omega^2(i)}} \quad (4)$$

式中: ω 为原始水印的奇异值; $\bar{\omega}$ 为提取到水印的奇异值; $r = \min(m, n)$ (m, n 是 ω 的大小)。 ρ 的值在 $[-1, 1]$ 之间。如果 ρ 的值等于 1, 那么提取的奇异值就等于原始奇异值。如果 ρ 的值是 -1, 那么差值对于最大奇异值是负的。在这种情况下, 图像的较亮部分变暗, 较暗部分变浅, 即构造的水印看起来像负片。所有提取的主要和次要水印的 ρ 值见表 1。

相关性系数代表了含水印的估计值, 该值越接近 1, 说明图像含水印的可能性越大。从表 1 中可以看到, 该算法下 4 幅图像攻击仿真测试中, 主水印相关

表 1 提取的主要和次要水印的相关系数
Tab.1 Correlation coefficient of extracted primary and secondary watermarks

攻击类型	ρ							
	Lena		Baboo		Cameraman		Peppers	
	主水印	次级水印	主水印	次级水印	主水印	次级水印	主水印	次级水印
裁剪 (10%)	0.9872	0.9872	0.9984	0.9147	0.9890	0.9974	0.9981	0.8832
旋转 (15°)	0.9676	0.9676	0.9543	0.6043	0.9364	0.8246	0.9693	0.9864
JPEG 压缩 (40:1)	0.9860	0.9860	0.9911	0.9996	0.9802	0.9845	0.9854	0.9988
JPEG2000 压缩 (40:1)	0.9723	0.9723	0.9656	0.9784	0.9615	0.9759	0.9671	0.9774
加性高斯噪声 (0.05)	0.9698	0.9698	0.9932	0.9970	0.9611	0.9559	0.9725	0.9487
中值滤波 (5×5)	0.9746	0.9746	0.9677	0.9755	0.9732	0.9832	0.9718	0.9814
对比度增强 (10%)	0.9902	0.8156	0.9976	0.9339	0.9777	0.9922	0.9919	0.8226
缩放 (50%)	0.9843	0.9879	0.9810	0.9849	0.9826	0.9850	0.9841	0.9875

系数均大于次级水印相关系数,均高于 0.93,说明算法针对主水印的鲁棒性较强,次级水印则受图像和攻击类型而有不同,其中 Baboo 抗旋转鲁棒性最差为 0.6,而在对比度攻击测试中 Lena 和 Peppers 的次级水印只有 0.8,说明该算法对次级水印的提取在旋转攻击和对比度增强攻击中鲁棒性较低。

关于几何攻击,包括旋转、平移和缩放,文中提出的算法对这些攻击的鲁棒性较强,主要表现在以下几个影响因素方面:旋转,图像 I 和它的旋转图像 I^r ,具有相同的奇异值;转置,图像 I 和它的转置图像 I^T ,具有相同的奇异值;缩放,图像 I 和它的缩放图像 I^s ,如果 I 有奇异值 σ_i ,则 I^s 具有奇异值 $\sigma_i \times \sqrt{L_R L_C}$,其中 L_R 和 L_C 分别是行和列的缩放因子。如果行(列)相互缩放,则 I^s 具有奇异值 $\delta_i \times \sqrt{L_R} (\delta_i \times \sqrt{L_C})$ 。

4 结语

文中提出了一种基于 QR 码和 DWT-SVD 分解的双水印算法,将次级二值水印的奇异值嵌入到主水印 QR 码的一级小波分解后的低频系数奇异值中,然后再将含有次级水印的 QR 码奇异值嵌入到主图像的二级小波分解后的低频系数中。仿真实验结果表明该算法在满足不可见性的同时,能够对含水印主图像提取的水印再次进行水印信息提取,以达到二次防伪的目的。与单一 QR 码水印算法相比,双水印算法可对提取的水印进一步进行认证,从而达到多重安全的目的,也可以将一个 QR 码水印与不同次级水印进行组合,实现同一版权不同作品的认证目的,拓展水印的应用功能。算法属于非盲水印,具有一定的实际应用价值。

参考文献:

- [1] NGUYEN T H, DUONG D M, DUONG D A. Robust and High Capacity Watermarking for Image Based on

DWT-SVD[C]// Computing & Communication Technologies Research, Innovation, and Vision for the Future(RIVF), 2015 IEEE RIVF International Conference on, Can Tho, 2015: 83—88.

- [2] VONGPRADHIP S, RUNGRAUNGSILP S. QR Code Using Invisible Watermarking in Frequency Domain[C]// 2011 Ninth International on ICT and Knowledge Engineering, 2012: 47—52.
- [3] XIE Rong-sheng, WU Ke-shou, XU Gao-pan, et al. Research on Anti-Counterfeiting Quick Reaponse 2D Barcode Techniques Based on Digital Watermark[J]. Shanghai Jiaotong Univ (sci), 2013, 18(4): 443—447.
- [4] 白韬韬, 刘真, 卢鹏. 基于 QR 码的抗几何攻击数字水印[J]. 包装工程, 2013, 34(11): 113—116.
- BAI Tao-tao, LIU Zhen, LU Peng. Geometrical Attack Resistant Digital Watermarking Based on QR Code[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(11): 113—116.
- [5] ZHANG W J, MENG X T. An Improved Digital Watermarking Technology Based on QR Code[C]// 2015 4th International Conference on Computer Science and Network Technology (ICCSNT), Harbin, 2015: 1004—1007.
- [6] 石红芹, 余鹰, 王艳. 一种基于 NSCT 与小波变换的全频域双水印算法[J]. 包装工程, 2017, 34(15): 155—160.
- SHI Hong-qin, YU Ying, WANG Yan. A Full Frequency-Domain Double-watermarking Algorithm Based on NSCT and Wavelet Transform[J]. Packaging Engineering, 2017, 34(15): 155—160.
- [7] 刘丽, 周亚建, 张斌, 等. 基于 DCT 和 SVD 的 QR 码数字水印算法[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(S2): 304—311.
- LIU Li, ZHOU Ya-jian, ZHANG Bin, et al. Digital Watermarking Method for QR Code Images Based on DCT and SVD[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(S2): 304—311.
- [8] 于海娇, 孙刘杰, 李毓彬, 等. 基于 QR 码的 DWT-SVD 数字水印算法[J]. 包装工程, 2015, 36(23): 125—129.

- YU Hai-jiao, SUN Liu-jie, LI Yu-bin. Digital Watermark Algorithm with DWT-SVD Based on QR Code[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(23): 125—129.
- [9] 薛青晨, 吴丹, 陈大庆, 等. 基于 DWT-SVD 和 QR 码的抗几何攻击数字水印技术[J]. 包装工程, 2016, 37(11): 158—162.
- XUE Qing-chen, WU Dan, CHEN Da-qing, et al. Geometrical Attack Resistant Digital Watermarking Technology Based on DWT-SVD and QR Code[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(11): 158—162.
- [10] 何冰, 朱志平. 基于对数极坐标下的 SVD 数字水印算法[J]. 计算机与数字工程, 2011, 39(10): 138—141.
- HE Bing, ZHU Zhi-ping. A Digital Watermarking Algorithm Based on SVD and Log-polar Coordinates[J]. Computer & Digital Engineering, 2011, 39(10): 138—141.
- [11] SWANSON M D, ZHU B, TEWFIK A H, et al. Robust Audio Watermarking Using Perceptual Masking[J]. Signal processing Elsevier, 1998, 66(3): 337—355.
- [12] BHATNAGAR G, RAMAN B, SWAMINATHAN K. DWT-SVD Based Dual Watermarking Scheme[J]. International Conference on Applications of Digital Information & Web Technologies, IEEE, 2008: 526—531.
- [13] 杨剑, 朱莉. 基于分块的 DCT 域和 DWT 域的双水印算法改进[J]. 电子设计工程, 2016, 24(18): 145—148.
- YANG Jian, ZHU Li. Dual Watermarking Algorithm Based on DCT Domain and DWT Domain Chunked Improvement[J]. Electronic Design Engineering, 2016, 24(18): 145—148.
- [14] 郭倩, 陈广学, 陈奇峰. 基于 DCT-SVD 的双 QR 码水印防伪算法[J]. 包装工程, 2015, 36(17): 119—125.
- GUO Qian, CHEN Guang-xue, CHEN Qi-feng. Double QR Code Watermarking Algorithm Based on DCT-SVD[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(17): 119—125.
- [15] 孙业强, 王晓红, 李肖赫. 基于 QR 码和 DWT-SVD 技术的双彩色盲水印算法[J]. 包装工程, 2017, 38(11): 193—198.
- SUN Ye-qiang, WANG Xiao-hong, LI Xiao-he. Double Color Blind Watermarking Algorithm Based on QR Code and DWT-SVD[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(11): 193—198.