

多尺寸普适的抗印刷扫描水印算法

张雯

(天津职业大学, 天津 300410)

摘要: **目的** 为了赋予固定尺寸水印自适应不同尺寸宿主图像的尺寸普适性, 提出一种多尺寸普适的抗印刷扫描水印算法。 **方法** 对宿主图像进行裁剪、分层、分块获得图块, 计算每个图块的最大奇异值, 取最大奇异值前九的图块组成拼接图像, 结合水印嵌入算法在拼接图像中抽取获得待嵌图像, 将制成全息图的水印嵌入待嵌图像的 DWT 域内。 **结果** 实验表明, 将固定尺寸水印嵌入不同尺寸宿主图像后, 随着宿主图像尺寸的增加, 水印图像的不可见性明显提高, 并且经历模拟印刷扫描可顺利提取水印。 **结论** 该算法不仅可以赋予固定尺寸水印适应不同尺寸宿主图像的普适性, 且提升了水印嵌入后的不可见性, 对印刷扫描具有较好的鲁棒性, 为数字水印在印刷防伪领域的应用研究提供了新思路。

关键词: 水印; 多尺寸; 普适; 全息图

中图分类号: TS805.4; TS853+.6 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2020)13-0261-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.13.037

Universal Multi-size Watermarking Algorithm for Print-and-Scan Process

ZHANG Wen

(Tianjin Vocational Institute, Tianjin 300410, China)

ABSTRACT: The work aims to propose a universal multi-size watermarking algorithm for anti-print-scan process to provide a universality that helps fixed-size watermarks to adapt to host images of different sizes. Host image was divided into layers and blocks to obtain the blocks images and calculate the maximum SVD values of each blocks images. The blocks with the top nine maximum SVD value were selected to form the await-embed image. The holographic watermark was embedded into DWT domain of the await-embed image. The experiments showed that, after embedding the fixed watermark into the host image of different sizes, the invisibility of the watermark image was significantly improved with the increase of the host image size, and the watermark could be extracted smoothly after simulated anti-print-scan process. This algorithm could not only provides the universality that helps fixed-size watermarks to adapt to host images of different sizes, but also improves the invisibility of the watermark after embedding. It shows good robustness to print-scan process, and provides a novel method for the application of digital watermark in anti-counterfeiting printing.

KEY WORDS: watermark; multi-size; universal; hologram

数字水印通过引入人眼不能察觉但计算机程序可以重新读取的数据嵌入宿主图像^[1-2]。嵌入的数据位置由密钥决定, 具备较高的安全性, 可用于数字图像、视频的版权保护^[1-5]。随着数字水印技术日趋成

熟, 不少学者着眼于提升水印抗剪切、抗几何攻击的鲁棒性, 如将全息图作为水印嵌入宿主图像, 利用全息图独特的不可撕毁性提升了水印抗剪切攻击的鲁棒性^[6], 如基于尺度不变特征^[7]、基于极谱变换^[8-9]

收稿日期: 2019-10-25

基金项目: 2018 年度教育部人文社会科学研究项目 (18YJCZH171)

作者简介: 张雯 (1989—), 女, 硕士, 天津职业大学讲师, 主要研究方向为印刷品全息水印防伪技术。

的抗几何攻击的水印算法被提出，再如抗印刷拍照的数字水印算法相继被报道^[10-11]，上述研究为数字水印向包装印刷防伪领域的移植应用打下了坚实基础，可以将数字水印技术的应用领域拓展到书籍、商品包装。

书籍或商品包装的形状大多以横、纵像素数不相等的矩形为主。目前，实验阶段的水印、宿主图像均为正方形，即将固定尺寸的水印嵌入与其相应尺寸的宿主图像中^[1-16]，对水印、宿主图像自身的纵横比和二者之间的尺寸比例要求苛刻。

文中提出一种多尺寸普适的抗印刷扫描水印算法，包括宿主变换算法和嵌入算法。宿主变换算法是将宿主图像分离为不同图层后划分为多个图块，计算每个图块的最大奇异值，由图块组成拼接图像，结合水印嵌入算法在拼接图像中抽取获得待嵌图像，利用最大奇异值的稳健性定位图块，保证经历印刷扫描攻击后仍可获得相同的待嵌图像，并且宿主变换算法可自适应大尺寸宿主图像，提升水印嵌入后的不可见性。嵌入算法将制成全息图的水印嵌入到待嵌图像的DWT域内，借助制作全息水印提升算法抗剪切的鲁棒性，结合DWT变换权衡水印的鲁棒性与不可见性。

1 关键技术

1.1 奇异值分解

将一幅数字图像定义为 M ， $M \in R^{m \times n}$ ，其中 R 为实数域，且 $n \geq m$ ，则 M 的奇异值分解 (Singular Value Decomposition, SVD) 为：

$$M = USV^T = \sum_{i=1}^n \sigma_i u_i v_i^T \quad (1)$$

式中： U 、 V 为正交矩阵，上标 T 表示转置； S 为对角阵，则 S 对角线上元素 $\sigma_i = \sqrt{\lambda_i}$ ($i = 1, 2, \dots, n$) 是矩阵 M 的奇异值， λ_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 是 $M^T M$ 的特征值。

前若干奇异值大于其他奇异值，因而与矩阵 S 的其他值相比，最大奇异值对图像的影响占主导地位，且最大奇异值具备更好的稳健性^[17]。文中将利用最大奇异值的稳健性标定图块。

1.2 全息图

全息图包括了振幅和相位这 2 方面信息，具备独

特的不可撕毁性，即可通过部分信息复原整体，以提升水印的鲁棒性；数字全息图由高频干涉条纹组成，人眼视觉对其不敏感，因而全息图在一定程度上可提升水印的不可见性。此外，全息图的记录和再现需要相同的光波波长和衍射距离，因而也提升了水印的安全性^[6]，因此，文中采用博奇编码的傅里叶计算全息图^[13]，将水印制成全息图后嵌入到宿主图像中。

1.3 离散小波变换

1909 年，Haar 将一个与傅里叶类似的基定义为 Haar 小波变换。与傅里叶变换相比，Haar 小波变换可以更好地同时展现图像的空间和频域特性，这种多尺度变换类似于人眼视觉模型^[12]。一级、二级 Haar 小波分解见图 1。

对宿主图像进行一次小波分解，获得其一级低频 (A) 水平高频 (H) 垂直高频 (V) 对角高频 (D) 子带，对一级低频 (A) 子带进行二次小波分解，获得二级低频 (AA) 水平高频 (AH) 垂直高频 (AV) 对角高频 (AD) 子带。即可进行多次分解，将低频部分分解为 4 个尺寸相同的子带，以此类推，可将图像分解为不同分辨率子带。人眼视觉对低频部分敏感，若在低频嵌入水印，水印的不可见性降低；而在高频部分嵌入水印相对脆弱，综合考虑上述因素，选择嵌入位置为低频的对角高频 (AD) 子带，该子带相对处于图像的中频，一定程度上权衡了水印的不可见性和鲁棒性。

2 嵌入与提取水印

算法中，在水印嵌入前加入了宿主变换的步骤，在对宿主图像进行裁剪、分层、分块等操作后，利用最大奇异值的稳健性定位图块，形成拼接图像，再结合嵌入水印的算法确定待嵌图像尺寸，由拼接图像中抽取出待嵌图像。整体流程见图 2。

2.1 宿主变换

1) 选取宿主图像与水印。通常宿主图像为正方形图像，文中选取了正方形宿主图像 Host1 和矩形宿主图像 Host2，定义宿主图像的尺寸为 m_A 像素 \times n_A 像素。

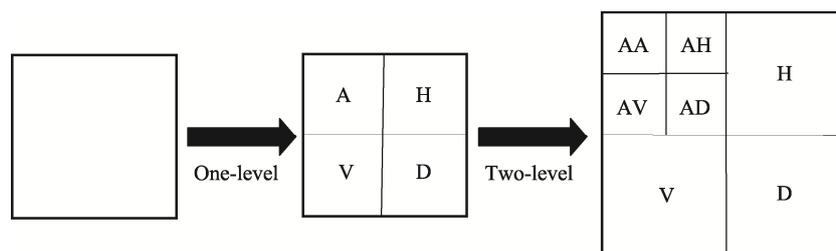


图 1 一级、二级小波分解

Fig.1 Wavelet decomposition diagram of 1-level and 2-level

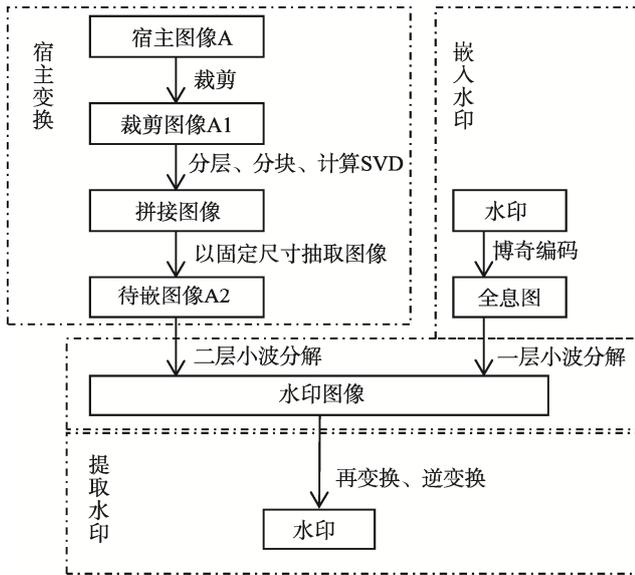


图 2 整体流程
Fig.2 Flow chart

宿主图像 Host1 的尺寸为 1027 像素×1027 像素 (即 $m_A=n_A=1027$), 宿主图像 Host2 的尺寸为 1347 像素×2020 像素 (即 $m_A=1347, n_A=2020$), 见图 3。
选取的水印见图 4, 其尺寸为 64 像素×64 像素。



图 3 宿主图像
Fig.3 Host image



图 4 水印
Fig.4 Watermark

2) 裁切宿主图像。定义分块数为 N , 即拼接图像由 $N \times N$ 个图块组成。文中案例 $N=3$ 。

由宿主图像左上角第 1 个像素起截取 m_{A1} 行 n_{A1} 列的像素, 获得裁剪图像 A1。其中, m_{A1} 为图像 A1 的像素行数, m_{A1} 为小于等于 m_A 且能被 N 整除的最大值; n_{A1} 为图像 A1 的像素列数, n_{A1} 为小于等于 n_A 且能被 N 整除的最大值。

具体到宿主图像 Host1, 获得的裁剪图像 A1_1 尺寸为 1026 像素×1026 像素; 具体到宿主图像 Host2, 获得的裁剪图像 A1_2 尺寸为 1347 像素×2019 像素。

3) 组成拼接图像 A2。分别对裁剪图像 A1_1 和 A1_2 按照红 (R) 绿 (G) 和蓝 (B) 3 个颜色分离图层, 分别得到 3 个单色图; 对每个单色图进行分块, 以网格的形状各分成 3×3 个图块。

具体到宿主图像 Host1 的裁剪图像 A1_1, 其每个图块的像素行数和像素列数均为 342; 具体到宿主图像 Host2 的裁剪图像 A1_2, 其每个图块的像素行数为 449、像素列数为 673。

以图块为单位进行奇异值分解, 计算每个图块的最大奇异值, 再将最大奇异值由大到小排列形成序列, 选取序列中前 9 个图块组成拼接图像 A2。判断最大奇异值是否在前 9 的顺序为从上至下逐行判断过程中, 每一行图块判断的顺序为从左至右; 拼接已选取的图块顺序为依次从左至右逐列拼接, 每一列图块的拼接顺序为从上至下。

具体到宿主图像 Host1 和 Host2, 其拼接图像 A2 见图 5。

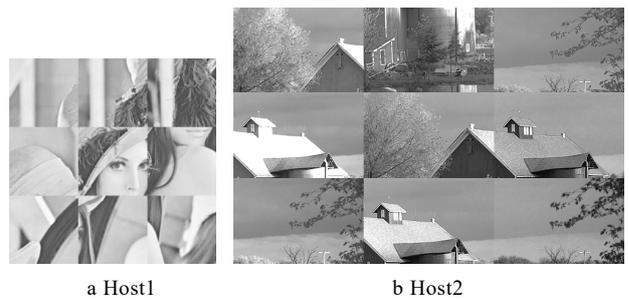


图 5 拼接图像
Fig.5 Merging image

4) 确定待嵌图像 A3。不同水印嵌入算法要求的水印和待嵌图像 A3 的尺寸比例不同。定义待嵌图像 A3 与水印尺寸之比为 η , η 由嵌入水印的算法决定, 具体到文中采用的嵌入算法 η 为 8。在 m_{A1} 和 n_{A1} 中取较小值并定义为 mn , 定义水印的横向、纵向像素数为 m_B (此例中 $m_B=64$), 根据式 (2) 计算 e 值。

$$e = \frac{mn}{\eta \times m_B} \tag{2}$$

具体到宿主图像 Host1, 其 e 值为 2.0039; 具体到宿主图像 Host2, 其 e 值为 2.6309。

定义 r 为不小于 1 的自然数, 且 $r \leq r+1$, 从而确定 r 值 (文中两例中 r 均为 2)。由图像 A2 的第 1 行像素开始, 每隔 r ($r=2$) 行抽取 1 行, 共抽取 $\eta \times m_B$ 行 (此例中为 $8 \times 64=512$ 行), 由拼接图像 A2 的第 1 列像素开始, 每隔 r 列抽取 1 列, 共抽取 $\eta \times m_B$ ($8 \times 64=512$) 列, 抽取的 $\eta \times m_B$ 行和 $\eta \times m_B$ 列组成待嵌图像 A3, 见图 6。

2.2 嵌入水印

将正方形的水印 (见图 4) 制作成全息图, 见图 7。

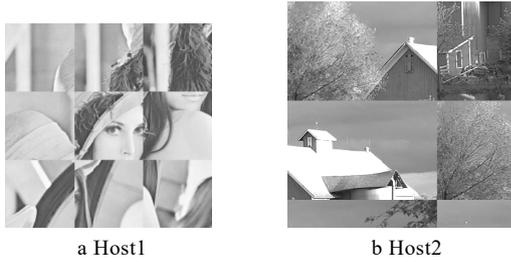


图6 待嵌图像
Fig.6 Await-embed images

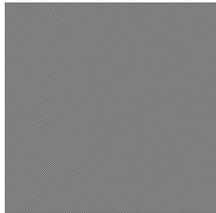


图7 全息图
Fig.7 Hologram

对全息图进行一层小波分解,取其对角高频信息 D;对拼接图像 A3(见图6)进行二层小波分解,取其低频的对角高频信息 AD。将 D 代换嵌入至 AD,嵌入方程见式(3)。

$$M'(i, j) = \alpha m'(i, j) \quad (3)$$

式中: $M'(i, j)$ 为水印嵌入后 AD 位置的系数值; α 为强度因子, α 为 0.5~2.5, 文中选取强度因子 $\alpha=1.0$, $m'(i, j)$ 为全息图进行一层小波分解 D 位置的系数值; 进行二层逆小波运算, 获得含有水印的图像, 见图 8。

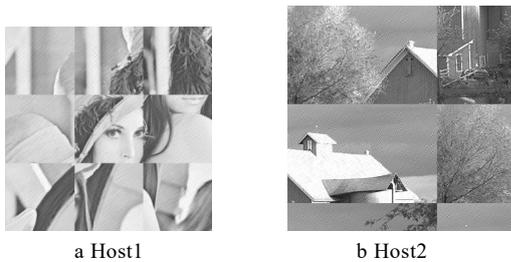


图8 含水印图像
Fig.8 Watermarked image

对含有水印的图像(图8)做2.1节中宿主变换的逆变换,完成水印的嵌入,获得水印图像,见图9。

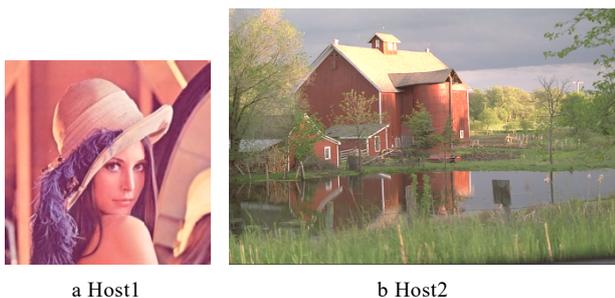


图9 完成的水印图像
Fig.9 Finished watermarked image

2.3 提取水印

需要鉴别水印时,对水印图像(见图9)做2.1节中宿主变换,获得已嵌图像,应用与嵌入算法相对应的提取算法,由已嵌图像中提取水印。提取到的水印见图10,其NC值分别为0.9329和0.9306。



图10 提取水印
Fig.10 Extracted watermarks

3 实验结果分析

3.1 保真度评价

文中采用峰值信噪比(Peak Signal to Noise Ratio, PSNR)评价添加水印后图像的保真度,采用归一化相关系数(Normalized Coefficient, NC)度量提取出的水印质量。

如表1所示,水印的NC值在0.9以上,算法初步可行。值得注意的是,嵌入水印后图像的PSNR值虽然均在37dB以上,但是并不稳定,其中Host1的PSNR值偏低。笔者分析,一方面是由于宿主图像Host1的尺寸相对较小,在嵌入相同尺寸水印的情况下,其保真度较低;另一方面,组成Host1拼接图像的图块均来自于R层,而组成Host2拼接图像的图块来自R, G, B 3层,水印可藏匿于宿主图像不同层的不同位置。在下一步研究中,可根据不同宿主图像的尺寸、颜色特征等参数变更组成拼接图像的图块数量,合理将水印分布隐藏在宿主图像的各个图层,从而进一步提高算法保真度。

表1 图像嵌入水印的测试结果
Tab.1 Test result of images after embedding watermark

| 图像 | PSNR 值/dB | NC 值 |
|-------|-----------|--------|
| Host1 | 37.5437 | 0.9329 |
| Host2 | 41.8465 | 0.9309 |

3.2 模拟抗印刷扫描实验

应用PHOTOSHOP软件模拟印刷扫描效果,考察算法抗印刷扫描攻击的鲁棒性。

1) 应用PHOTOSHOP软件打开水印图像(见图9),变换其图像“模式”为“CMYK颜色”。

2) 进行分离通道,分离出C, M, Y和K等4个灰度图像。

3) 依次将上述4个图像转变为位图,“方法”为

“半调网屏”，“半调网屏”的参数为“50 线/英寸”，“形状”为“圆形”。Host1 的 C, M, Y 和 K 图像的“角度”依次为 15, 45, 0 和 75 度，Host2 的 C, M, Y 和 K 图像的“角度”依次为 45°, 15°, 0°和 75°。

4) 将上述 C, M, Y 和 K 位图图像再次转换为灰度图，“大小比例”为“1”。

5) 以“CMYK 颜色”模式合并通道，获得模拟印刷的图像。

6) 变换模拟印刷图像的“模式”为“RGB 颜色”。

模拟印刷扫描效果及 Host1 模拟印刷的局部放大效果见图 11。

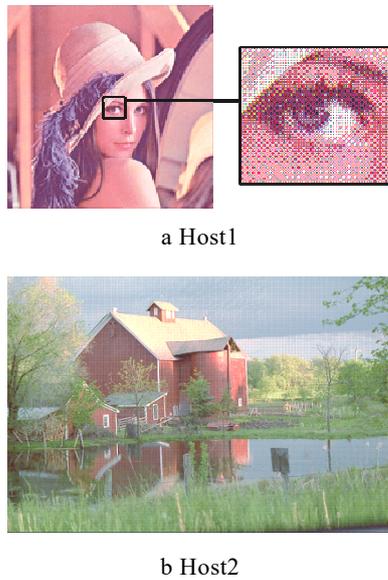


图 11 模拟印刷扫描

Fig.11 Simulated print-and-scan process

对模拟印刷扫描后的图像（见图 11）做 2.1 节中宿主变换，获得已嵌图像，应用与嵌入算法相对应的提取算法，由已嵌图像中提取水印。提取到的水印见图 12，人眼勉强可识别“科技大学”文字。

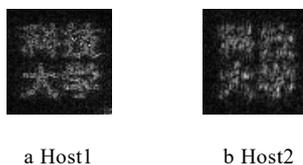


图 12 模拟后提取水印

Fig.12 Extracted watermarks after simulation

模拟印刷扫描后的测试结果见表 2，图像的 PSNR 值急剧下降，基本不超过 10 dB，说明模拟印刷扫描攻击后的图像与原宿主图像存在明显差异，在这种条件下，水印的 NC 值仍可保持在 0.7 以上。并且，与表 1 相比，PSNR 值明显下降，可见经历印刷扫描攻击后，导致 PSNR 值下降的主要原因是印刷、扫描攻击，而不再是水印嵌入导致的图像质量下降。

值得一提的是，与 Host2 相比，Host1 的 PSNR 和 NC 均明显偏高，认为这与宿主图像自身的颜色值、尺寸以及选用的模拟印刷方式、参数有关，下一步研究可由此展开。

表 2 模拟印刷扫描后的测试结果

Tab.2 Test result after simulated print-and-scan process

| 图像 | PSNR 值/dB | NC 值 |
|-------|-----------|--------|
| Host1 | 8.6044 | 0.7847 |
| Host2 | 7.8302 | 0.7171 |

4 结语

提出了一种多尺寸普适的抗印刷扫描水印算法。利用图块最大奇异值在印刷前后的稳健性定位图块，保证经历印刷扫描攻击后仍可获得相同的待嵌图像。借助全息图的不可撕毁性提升水印算法的鲁棒性。应用 DWT 变换分离出宿主图像的中频，在中频嵌入水印，缓解水印不可见性与鲁棒性之间的矛盾。对比了在不同尺寸宿主图像中嵌入水印的不可见性，结果表明随着宿主图像尺寸的增加，水印图像的不可见性明显提高。经模拟印刷扫描实验，提取出人眼勉强可识别的文字水印，说明文中算法可作为在不同尺寸印刷品应用数字水印防伪技术的参考。

参考文献：

- [1] HEBAH H O N. Digital Watermarking a Technology Overview[J]. International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences, 2011, 6(1): 89—93.
- [2] TRÉMEAU A, MUSELET D. Recent Trends in Color Image Watermarking[J]. Journal of Imaging Science and Technology, 2009, 53(1): 1—15.
- [3] JIAO S, Zhou C, SHI Y, et al. Review on Optical Image Hiding and Watermarking Techniques[J]. Optics & Laser Technology, 2019, 109: 370—380.
- [4] VENI M, MEYYAPPAN T. Digital Image Watermark Embedding and Extraction Using Oppositional Fruit Fly Algorithm[J]. Multimedia Tools and Applications, 2019, 78(19): 27491—27510.
- [5] DIEGO R, DORA M B L, CAMILO L. Authenticity Verification of Audio Signals Based on Fragile Watermarking for Audio Forensics[J]. Expert Systems with Applications, 2018, 91: 211—222.
- [6] TAKAI N, MIFUNE Y. Digital Watermarking by a Holographic Technique[J]. Applied Optics, 2002, 41(5): 865—873.
- [7] LI J. Robust Image Watermarking Scheme Against Geometric Attacks Using a Computer-generated Hologram[J]. Applied Optics, 2010, 49(32): 6302—6312.

- [8] 肖宁, 李爱军. 基于几何校正与非下采样 Shearlet 变换的图像水印算法[J]. 信息与控制, 2019, 48(1): 97—106.
XIAO Ning, LI Ai-jun. Image Watermarking Algorithm Based on Geometric Correction and Non-subsampled Shearlet Transform[J]. Information and Control, 2019, 48(1): 97—106.
- [9] XU H, KANG X, CHEN Y, et al. Rotation and Scale Invariant Image Watermarking Based on Polar Harmonic Transforms[J]. Optik, 2019, 183: 401—414.
- [10] THONGKOR K, AMORNRAKSA T, DELP E J. Digital Watermarking for Camera-captured Images Based on Just Noticeable Distortion and Wiener Filtering[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2018, 53: 146—160.
- [11] PRAMILA A, KESKINARKAUS A, SEPPANEN T. Increasing the Capturing Angle in Print-cam Robust Watermarking[J]. Journal of Systems and Software, 2018, 135: 205—215.
- [12] QASIM A F, MEZIANE F, ASPIN R. Digital Watermarking: Applicability for Developing Trust in Medical Imaging Workflows State of the Art Review[J]. Computer Science Review, 2018, 27: 45—60.
- [13] 谢勇, 谭海湖, 王凯丽. 基于 DWT-QDFT 的硬拷贝彩色图像全息水印[J]. 光电子·激光, 2016, 27(10): 1086—1093.
XIE Yong, TAN Hai-hu, WANG Kai-li. A Hologram Algorithm Based on DWT-QDFT for Hardcopy Color Image[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2016, 27(10): 1086—1093.
- [14] XIAO Y Z, ZHAGN W, XIE Y. Influence of Different Color Space on Digital Watermarking for Anti-counterfeiting Printed Images[C]// Control and Decision Conference (CCDC), Qingdao, China, IEEE, 2015: 1535—1539.
- [15] 张雯, 孟婕. 数字水印技术在印刷防伪领域应用的研究进展[J]. 包装工程, 2017, 38(15): 143—148.
ZHANG Wen, MENG Jie. Progress of Applying Digital Watermarking Technology in Printing Anti-counterfeiting[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(15): 143—148.
- [16] 严敏, 陈军. 基于 QR 分解的 Contourlet 域抗几何攻击水印算法[J]. 计算机应用研究, 2016, 33(9): 2813—2818.
YAN Min, CHEN Jun. Anti-geometric Attack Watermarking Algorithm Based on QR Decomposition in Contourlet Domain[J]. Application Research of Computers, 2016, 33(9): 2813—2818.
- [17] SMITH R, SELF M, CHEESEMAN P. On the Representation and Estimation of Spatial Uncertainty[J]. International Journal of Robotics Research, 1987, 5(4): 56—68.