

图文信息技术

一种抗打印扫描的双彩色 QR 码水印算法

王晓红¹, 黄中秋¹, 孙业强¹, 肖颖²

(1.上海理工大学, 上海 200093; 2.上海出版印刷高等专科学校, 上海 200093)

摘要: **目的** 为了提高 QR 码的抗打印扫描能力, 提出一种抗打印扫描的双彩色 QR 码水印算法。**方法** 将彩色载体 QR 码分通道, 并对各通道进行三级小波变换和 SVD 分解, 将置乱后彩色水印图像分通道嵌入到对应载体图像特征矩阵中, 利用 DWT-Schur 分解嵌入标记矩阵的方法解决 SVD 分解带来的虚警率问题。**结果** 实验表明, 该算法在 100%识别的情况下, 具有较好的抗打印扫描能力。**结论** 该算法不仅具有较好的抗打印扫描能力, 且解决了 SVD 分解带来的虚警率问题, 同时对裁切、旋转和 JPEG 压缩等攻击具有较好的鲁棒性。

关键词: 彩色 QR 码; DWT; SVD; 水印; 虚警率; 抗打印扫描

中图分类号: TS801.3; TP309.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)03-0211-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.03.040

A Double Color Watermarking Algorithm with QR Code for Anti-print Scanning

WANG Xiao-hong¹, HUANG Zhong-qiu¹, SUN Ye-qiang¹, XIAO Ying²

(1.Shanghai University for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2.Shanghai Publishing and Printing College, Shanghai 200093, China)

ABSTRACT: The work aims to propose a double color watermarking algorithm with QR code for anti-print scanning to improve the anti-print scanning ability of the QR code. Firstly, the color carrier QR code was divided into several channels, and each channel was processed by three-level wavelet transform and SVD decomposition. Then, the channels of the scrambled color watermark image were embedded into the corresponding carrier image feature matrix, solving the problem of false alarm rate brought by SVD decomposition with DWT-Schur decomposition embedded into the mark matrix. The experiments showed that, the algorithm could be completely identifiable (100%) and had good anti-print scanning ability. The algorithm not only has good anti-print scanning ability, but also solves the problem of false alarm rate caused by SVD decomposition, and it has good robustness to the attacks such as cropping, rotation and JPEG compression.

KEY WORDS: color QR code; DWT; SVD; watermark; false alarm rate; anti-print scanning

随着物联网和信息技术的迅猛发展, QR 码因其具有纠错能力强、容量大、易于识别等优点, 在水印领域得到了广泛应用^[1]。数字水印技术作为版权保护的重要手段, 在不影响防伪对象的视觉感知前提下, 通过嵌入防伪信息, 用于证明作品的合法性、跟踪打击盗版行为。余勇^[2]提出基于奇异值分解的 Contourlet 域水印算法, 虽然在剪切、压缩方面的性能大幅提高, 但载体图像以及水印图像均为灰度图, 嵌入信息量较少。谢勇^[3]提出了抗打印扫描彩色图像水印算法, 利用四元数傅立叶变换和小波变换嵌入水

印, 在一定程度上能抵抗打印扫描, 但打印扫描后提取水印效果有待进一步改善。基于以上情况, 文中提出一种抗打印扫描的双彩色 QR 码算法, 不仅具有较强的抗打印扫描能力还解决了虚警率问题。

1 关键技术

1.1 QR 码

QR 码又称为快速响应矩阵码, 是二维条码的一种^[4-6]。与传统的条形码相比, QR 码具有更为广阔

收稿日期: 2017-05-24

基金项目: “柔板印刷绿色制版与标准化实验室”招标课题 (ZBKT201709)

作者简介: 王晓红 (1971—), 女, 博士, 上海理工大学教授, 主要研究方向为颜色科学和数字图像处理。

的发展空间。首先, QR 码容量密度大; 其次, QR 码还可以支持所有类型的数据; 同时, QR 码的“纠错能力”显著, 即当编码变脏甚至破损, 也可以自动恢复数据^[7-8]; 此外, 用户还可以根据不同的使用环境, 选择不同的 QR 码纠错等级, 但随着纠错等级的提高, 编码尺寸也会变大。

1.2 离散小波变换

离散小波变换是在短时傅里叶变换的基础上发展的能对图像的局部信号进行有效分析的变换函数^[9-10]。任意函数 $f(t)$ 的小波变换为 $F(a, b)$, 利用尺度参数 a 和定位参数 b 进行离散化处理, 可以选择 $a = a_0^m$, $a_0 > 0$, $m \in \mathbf{Z}$ 。令 $b = nb_0 a_0^m$, $b \in \mathbf{R}$, $n \in \mathbf{Z}$ 。所以小波函数 $\psi_{(a,b)}(t)$ 变换为:

$$\psi_{(a,b)}(t) = a_0^{-m/2} (a_0^{-m} t - nb_0) \quad (1)$$

离散小波变换定义为:

$$D_{WT} = \int_{\mathbf{R}} f(t) \psi_{(m,n)}(t) dt \quad (2)$$

离散小波变换对于任意一副图像经一级小波变换可分解为 4 个子图像: 低频子带 LL 和 3 个高频子带 LH, HL, HH。LL 保留了原图像的最基本部分, 比如颜色变化缓慢的区域, 高频则是保留了原图像的细节部分。如果再对低频子带 LL 做一次小波分解, 可以得到进一步的低频子带, 小波变换在每一级都按照左上、右下、左下、右下的顺序进行。

1.3 奇异值分解

矩阵的奇异值分解简称 SVD 分解, 是矩阵的对角化运算, 是一种正交变换^[11-12]。任意一副数字图像都可以看成一个 $M \times N$ 矩阵, 假设图像为 A , 则定义 A 的奇异值分解为:

$$A = U \Sigma V^T \quad (3)$$

式中: U 为 $M \times M$ 的左奇异值矩阵; V 为 $N \times N$ 的右奇异值矩阵; 矩阵 Σ 是 $M \times N$ 的对角矩阵, 且其 N 个奇异值满足 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_r \geq \sigma_{r+1} = \dots = \sigma_m = 0$ 。其中 r 为 Σ 的秩, 所以奇异值分解可表示为:

$$A = \sigma_1 U_1 V_1^T + \sigma_2 U_2 V_2^T + \dots + \sigma_r U_r V_r^T \quad (4)$$

奇异值在图像受到干扰时不会发生明显改变, 即图像的视觉特性变化不明显, 因此选择奇异值矩阵嵌入水印信息。此外, 奇异值分解具有较好的隐蔽性和抵抗几何攻击能力, 能够弥补离散小波变换不能很好抵抗几何攻击的缺陷, 因此奇异值分解和离散小波变换能够很好结合使用, 使数字水印的鲁棒性和算法的执行效率得到很大提高。

1.4 虚警率

虚警率是指对于没有嵌入水印信息的载体图像, 在使用正确密钥的前提下, 可以提取出与水印信息十分类似的图片的现象。基于 SVD 分解的水印算法存

在高虚警率是因为图像经过 SVD 分解后奇异值向量与图像之间并不存在一一对应关系, 不能刻画图像的几何结构, 因此, 解决虚警率问题是对 SVD 分解缺陷的很好补偿, 使得 SVD 分解技术在水印领域得到更为广泛应用。

2 嵌入与提取水印

2.1 嵌入水印

嵌入水印算法原理流程见图 1。

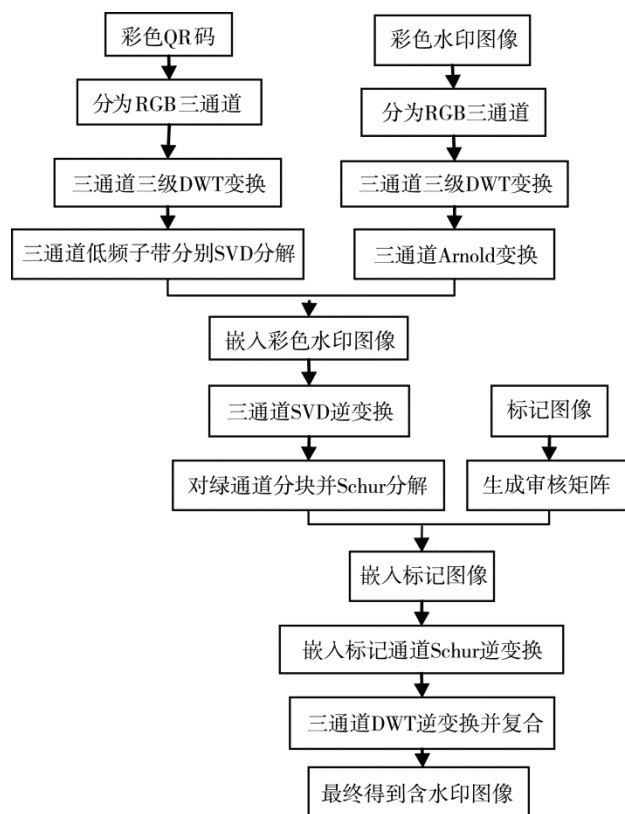


图1 嵌入算法流程

Fig.1 The process of embedding algorithm

水印嵌入算法步骤如下所述。

- 1) 对载体图像, 即彩色 QR 码 Z , 分通道并进行三级小波变换, 小波基为 Haar^[13]。
- 2) 对载体图像各通道的三级低频分量进行 SVD 分解, 可得载体图像对角矩阵 S 。
- 3) 对读入的彩色水印图像 W 分通道, 并进行三级小波变换, 小波基为 Haar。
- 4) 对水印图像三级低频分量进行置乱。
- 5) 嵌入水印。将水印图像分通道嵌入载体图像的对角矩阵中, 并保存 U_1 和 V_1 作为密钥。

$$S + \alpha W = U_1 \Sigma_1 V_1^T \quad (5)$$

式中: S 为步骤 2) SVD 分解后的对角矩阵; α 为水印嵌入强度; W 为水印信息; U_1, V_1 为对嵌入水印信息后的对角矩阵再次进行 SVD 分解生成的正交

矩阵； Σ_1 为对应的对角矩阵； T 为转置。

6) 对载体图像进行 SVD 逆变换。

7) 对图像中的绿色通道 (G 通道) 三级低频子带分块 Schur 分解^[13-17]。将低频子带划分成 4×4 的非重叠块, 对每一个子块进行 Schur 分解得到相应的 U_{ij} 矩阵。

8) 生成取值范围为 $0 \sim a$ 的随机矩阵, 再根据标记信息调节随机矩阵使其满足式 (6), 构成审核矩阵 Q_{ij} , 审核矩阵的阈值为 $q=a/2$ 。

$$\begin{cases} Q_{i,j} \geq q, W_{i,j} = 1 \\ Q_{i,j} < q, W_{i,j} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

9) 嵌入水印信息。基于式 (7) 结合审核矩阵将水印信息嵌入到步骤 7) 得到的每一块 U_{ij} 矩阵中的 W_{ij} 。

$$W_{i,j} = 1, \begin{cases} U'_{2,1} = \text{sign}(U_{2,1}) \times (U_{\text{avg}} - \frac{t}{2} \times Q_{i,j}) \\ U'_{3,1} = \text{sign}(U_{3,1}) \times (U_{\text{avg}} + \frac{t}{2} \times Q_{i,j}) \end{cases}$$

$$W_{i,j} = 0, \begin{cases} U'_{2,1} = \text{sign}(U_{2,1}) \times (U_{\text{avg}} + \frac{t}{2} \times Q_{i,j}) \\ U'_{3,1} = \text{sign}(U_{3,1}) \times (U_{\text{avg}} - \frac{t}{2} \times Q_{i,j}) \end{cases} \quad (7)$$

式中: $U_{2,1}$ 和 $U_{3,1}$ 分别为 U_{ij} 矩阵中第 2 行第 1 列的元素和第 3 行第 1 列的元素; $\text{sign}(U_{2,1})$ 为 $U_{2,1}$ 的符号; $U_{\text{avg}} = (|U_{2,1}| + |U_{3,1}|) / 2$; $|U_{2,1}|$ 为 $U_{2,1}$ 的绝对值。

10) 进行 Schur 逆变换和 DWT 逆变换, 合并三通道得到最终含水印载体图像, 并进行保存和打印。

2.2 提取水印

提取水印图像算法原理流程见图 2。提取水印算法步骤如下所述。

1) 使用扫描仪扫描打印后的含水印载体图像, 获得得到电子版图像 Z1。扫描仪分辨率为 600 dpi, 并利用 Adobe Photoshop CS5 进行裁切、重定像素与分辨率与载体图像 Z 一致。

2) 对载体图像 Z1 分通道, 并进行三级小波变换。

3) 对 G 通道进行分块 Schur 分解得到每个子块的 U'_{ij} 矩阵。

4) 根据每块 U'_{ij} 矩阵的第 2 行第 1 列和第 3 行第 1 列的系数 $U'_{2,1}$ 和 $U'_{3,1}$ 提取水印信息, 见式 (8)。

$$\begin{cases} W'_{i,j} = 1, |U'_{3,1}| \geq |U'_{2,1}| \\ W'_{i,j} = 0, |U'_{3,1}| < |U'_{2,1}| \end{cases} \quad (8)$$

式中: W'_{ij} 为提取的水印信息。

5) 对提取的标记图像进行双边滤波, 二值化处理后得到最终图像。

6) 计算提取标记图像 NC 值, 判断 NC 值是否大于设定阈值。如果大于设定阈值, 则进行步骤 6)

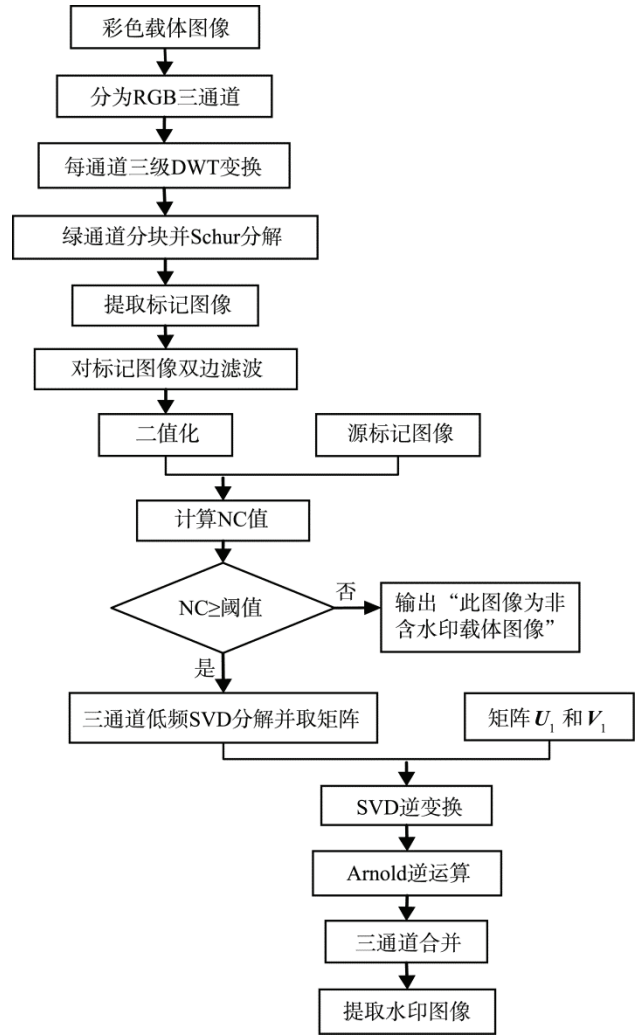


图 2 提取算法流程

Fig.2 The process of extraction algorithm

继续提取水印图像; 如果小于设定阈值, 则输出“此图像为非含水印载体图像”, 程序结束。

7) 对载体图像 Z1 的三级低频分量进行 SVD 分解, 得到对角矩阵 Σ_2 。

8) 利用式 (9) 对载体图像 Z1 进行 SVD 逆变换。

$$W = (U_1 \Sigma_2 V_1^T - S) / \alpha \quad (9)$$

9) 最后进行 Arnold 逆变换, 合并三通道获得水印图像。

3 实验结果分析

实验在 MatlabR2010a 平台上进行, 使用的打印设备为喷墨打印机 EPSON STYLUS PRO 4880C, 载体图像为 512×512 像素的彩色 QR 码图像, 水印图像为 512×512 像素 (根据不同要求, 可通过 imresize 调整水印图像大小) 的彩色图像, 标记图像为 64×64 像素的二值图像“USST”, 见图 3。文中水印图像的嵌入强度 t_1 为 0.15, 标记图像的嵌入强度 t_2 为 0.3。



图 3 彩色 QR 码、水印图像和标记图像
Fig.3 Color QR code, watermark image and mark image

3.1 评价指标

SSIM 又称结构相似性，是一种衡量 2 幅图像相似度的指标^[18]。对于给定的 2 幅图像，结构相似度定义为：

$$SSIM(w, w') = \frac{(2u_x u_y + c_1)(2\sigma_{xy} + c_2)}{(u_x^2 + u_y^2 + c_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + c_2)} \quad (10)$$

式中： u_x 为原水印图像 w 的平均值； u_y 为提取水印图像 w' 的平均值； σ_x^2 为 w 的方差； σ_y^2 为 w' 的方差； σ_{xy} 为 w 和 w' 的协方差。 $c_1 = (k_1 L)^2$, $c_2 = (k_2 L)^2$ ，是

用来维持稳定的常数， L 为像素值的动态范围，其中 $k_1=0.01$, $k_2=0.03$ 。

3.2 抗打印扫描实验

实验选取 4 种不同颜色的 QR 码作为载体图像，对嵌入水印后的含水印载体图像进行打印扫描，并提取水印，计算提取水印图像 SSIM 值，具体实验结果见图 4 和表 1。表 1 中“图像 1, 2, 3.....10”表示 10 个不同的水印图像，“版本 1, 2, 3, 4”代表 4 种不同颜色的载体图像。

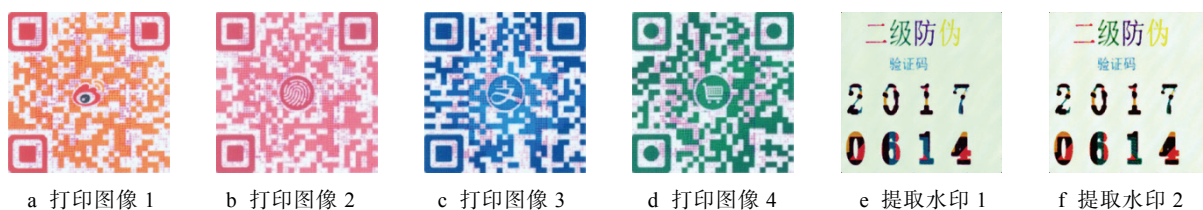


图 4 打印图像和提取水印图像
Fig.4 Print images and extracted watermark images

表 1 水印图像 SSIM 值
Tab.1 SSIM value of watermark image

图像	版本1	版本2	版本3	版本4
1	0.933 039	0.926 406	0.896 907	0.916 641
2	0.930 716	0.925 51	0.888 231	0.908 098
3	0.932 698	0.928 161	0.881 827	0.918 329
4	0.928 995	0.920 446	0.893 401	0.918 204
5	0.930 533	0.922 867	0.886 237	0.910 523
6	0.934 586	0.923 785	0.891 839	0.919 976
7	0.931 715	0.921 647	0.897 996	0.911 985
8	0.933 792	0.923 576	0.895 657	0.917 779
9	0.929 595	0.929 096	0.896 718	0.913 736
10	0.928 227	0.924 872	0.894 525	0.911 598

由图 2 和表 1 可以看出，经打印扫描后所提取的水印效果较好，其 SSIM 值最高达 0.934 586，且所有图像识别率都为 100%，所以文中算法具有较强的抗打印扫描能力，满足二级防伪要求。

3.3 虚警率问题

对于利用 SVD 分解后获得对角矩阵直接嵌入水印信息，由于正交矩阵内含有图像大部分结构信息，

使用的对角矩阵与图像不存在对应关系，从而产生虚警率问题。对于直接在对角矩阵中嵌入水印信息的方法，通过任意 QR 码提取水印信息，效果见图 5。可以看出伪水印图像与图 4 中水印图像相似度极高，不易分辨，因此解决虚警率问题对于水印算法的防伪应用具有现实意义。

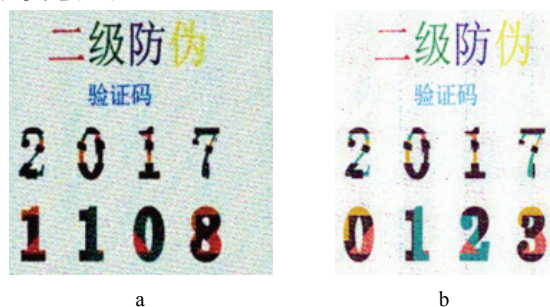


图 5 伪水印图像
Fig.5 Pseudo-watermark image

文中通过嵌入标记信息的方法来解决虚警率问题。嵌入标记图像与非嵌入标记图像 NC 值大小关系见表 2，其中“标记图像”代表嵌入标记的图像，“原载体图”代表只嵌入水印图像而没有嵌入标记图像的图像。

表 2 嵌入标记图像与非嵌入标记图像 NC 值
Tab.2 NC value of embedded mark image and non-embedded mark image

实验图像		图像1	图像2	图像3	图像4	图像5	图像6	图像7	图像8	图像9	图像10	平均值
版本1	标记	0.9648	0.8387	0.8875	0.9951	0.9384	0.9540	0.9784	0.9863	0.9755	0.6842	0.9158
	原载体	0.3812	0.5366	0.3695	0.6256	0.6109	0.6383	0.5630	0.5131	0.4457	0.5356	0.5360
版本2	标记	0.9081	0.9521	0.9354	0.9696	0.7927	0.9804	0.7966	0.9687	0.9589	0.9454	0.9221
	原载图	0.5816	0.6311	0.4975	0.4907	0.5483	0.5767	0.6732	0.6432	0.6207	0.5933	0.5860
版本3	标记	0.9530	0.9638	0.7878	0.6876	0.9393	0.7620	0.9198	0.9579	0.9481	0.9726	0.8828
	原载体	0.6390	0.4095	0.3929	0.3665	0.6080	0.4819	0.5092	0.6422	0.4046	0.6568	0.4983
版本4	标记	0.9765	0.6969	0.9071	0.9706	0.8514	0.9726	0.9452	0.9775	0.8856	0.9608	0.9082
	原载体	0.6168	0.5337	0.6314	0.4154	0.5728	0.4301	0.5151	0.6480	0.5816	0.5640	0.5443
任意QR码		0.4242	0.2707	0.4076	0.3567	0.4242	0.4491	0.3550	0.4768	0.2657	0.3755	0.3806
任意图像		0.4496	0.3147	0.4545	0.5444	0.2297	0.3519	0.4330	0.5415	0.0342	0.2707	0.3624

通过分析可知，嵌入标记图像 NC 值较高，均值在 0.9 以上，而非嵌入标记图 NC 值较低，均值在 0.5 左右，且任意 QR 码图像 NC 值平均值只有 0.3806，任意图像提取标记图像 NC 值为 0.3624 远低于限定阈值。由此可见，此方法可以有效解决虚警率问题。

3.4 鲁棒性攻击实验

该方法除了抗打印扫描性能优越，同时对旋转裁剪、噪声滤波和 JPEG 压缩等常规攻击具有较强的鲁棒性。通过 Matlab 仿真检验该算法对其他恶性攻击的抵抗能力结果见表 3。

表 3 鲁棒性攻击实验结果 (SSIM 值)
Tab.3 The experimental result of robustness attack (SSIM value)

彩色QR码	版本1	版本2	版本3	版本4
1/4裁切	0.857 538	0.821 845	0.873 823	0.915 515
旋转33°	0.765 085	0.715 424	0.880 736	0.898 915
旋转121°	0.772 609	0.718 697	0.882 464	0.900 868
50%JPEG压缩	0.831 919	0.779 158	0.885 945	0.907 201
5%JPEG压缩	0.790 276	0.686 94	0.832 889	0.845 546
0.01椒盐噪声	0.666 521	0.670 988	0.847 283	0.792 551
0.1斑纹噪声	0.499 281	0.537 159	0.716 182	0.570 523
泊松噪声	0.618 079	0.598 887	0.764 243	0.676 91

由表 3 可知该算法在识别率为 100%的前提下，进行 1/4 裁切攻击后，提取水印 SSIM 值为 0.8672，旋转 33° 为 0.8151，旋转 121° 为 0.8186，50%JPEG 压缩为 0.8511，5%JPEG 压缩为 0.7889，0.01 椒盐噪声为 0.7443，泊松噪声为 0.6645。由数据分析可知，算法能够很好地抵抗多种攻击，稳健性较强。其中，对 JPEG 压缩、裁剪、旋转等攻击的抗攻击能力较强。

4 结语

提出了一种解决虚警率的抗打印扫描算法，首先

对彩色载体图进行 DWT 和 SVD 分解，并利用离散小波变换的多分辨率特性和奇异值矩阵的稳定性，嵌入水印图像。通过对载体图像单通道分块 Schur 分解嵌入标记矩阵，从而解决虚警率的问题。实验证明，在保证载体图像 100%识别的前提下，该方法不仅解决抗打印扫描以及虚警率问题，对剪切、压缩、旋转等攻击也具有较好的鲁棒性。

参考文献：

[1] ZHANG Wei-jun, MENG Xue-tian. 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.

[2] 余勇. 基于奇异值分解的 Contourlet 域水印算法[J]. 包装工程, 2017, 38(7): 202—205.

YU Yong. Contourlet Domain Watermarking Algorithm Based on Singular Value Decomposition[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(7): 202—205.

[3] 谢勇, 谭海湖, 王凯丽, 等. 抗打印扫描彩色图像水印算法[J]. 包装工程, 2016, 37(13): 151—156.

XIE Yong, TAN Hai-hu, WANG Kai-li, et al. Color Image Watermark Algorithm Robust to the Print-and-scan Process[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(13): 151—156.

[4] 徐江峰, 张守强. 基于 QR 码的 DWT-DCT 数字水印算法[J/OL]. 计算机应用研究, 2018(4): 6(2017-04-01). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1196.TP.20170401.1739.102.html>.

XU Jiang-feng, ZHANG Shou-qiang. Algorithm of DWT-DCT Digital Watermarking Based on QR Code [J/OL]. Application Research of Computers, 2018(4): 6 (2017-04-01). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1196.TP.20170401.1739.102.html>.

[5] 卢斌. QR 码识别方法研究及应用[D]. 南京: 南京理工大学, 2013.

LU Bin. Research on Identification Method of QR

- Code and Its Application[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2013.
- [6] 龚冬梅. 基于 QR 码的数字全息水印技术研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2015.
GONG Dong-mei. Research in Digital Holographic Watermarking Technology Based on QR Code[D]. Soochow: Soochow University, 2015.
- [7] 刘永俊, 秦立浩. 二维码水印加密并行化嵌入及提取方法[J]. 常熟理工学院学报, 2017, 31(2): 39—42.
LIU Yong-jun, QIN Li-hao. A Parallel Embedding and Extracting Method of Watermarking Encryption in the QR Code[J]. Journal of Changshu Institute of Technology, 2017, 31(2): 39—42.
- [8] 白韬韬, 刘真, 卢鹏. 基于 QR 码的 Contourlet 域数字水印算法[J]. 光电子·激光, 2014(4): 769—776.
BAI Tao-tao, LIU Zhen, LU Peng. Digital Watermarking Scheme in Contourlet Domain Based on QR Code [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2014(4): 769—776.
- [9] 马婷, 陈农田, 王欣. 基于 NSCT-DWT-SVD 的强鲁棒多重数字水印算法[J]. 包装工程, 2016, 37(15): 50—55.
MA Ting, CHEN Nong-tian, WANG Xin. Stronger Robust Multiple Digital Watermarking Algorithm Based on NSCT-DWT-SVD[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(15): 50—55.
- [10] 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, et al. Digital Watermark Algorithm with DWT-SVD Based on QR Code[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(23): 125—129.
- [11] 谢勇, 张金龙, 张雯. 一种基于奇异值的抗打印/扫描的彩色图像零水印方案[J]. 包装学报, 2014, 6(3): 10—13.
XIE Yong, ZHANG Jin-long, ZHANG Wen. A Zero-watermark Scheme Based on Singular Value of the Resistance to Printing/Scanning Color Image[J]. Packaging Journal, 2014, 6(3): 10—13.
- [12] 钱华明, 于宏越. 基于 SVD-DWT 域数字图像水印算法[J]. 计算机仿真, 2009, 26(8): 104—107.
QIAN Hua-ming, YU Hong-yue. A Digital Image Watermarking Algorithm Based on SVD-DWT[J]. Computer Simulation, 2009, 26(8): 104—107.
- [13] 孙业强, 王晓红, 麻祥才, 等. 低虚警率彩色 QR 码数字水印方法: 中国, 106023054A[P]. 2016-10-12.
SUN Ye-qiang, WANG Xiao-hong, MA Xiang-cai, et al. Digital Watermarking Method for Color QR Code with Low False Alarm Rate: China: 106023054A[P]. 2016-10-12.
- [14] 王晓红, 孙业强. 基于 QR 码和 Schur 分解的感兴趣区域水印算法[J]. 光电子·激光, 2017(4): 419—426.
WANG Xiao-hong, SUN Ye-qiang. Region of Interest Based Watermarking Algorithm Based on QR Code and Schur Decomposition[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2017(4): 419—426.
- [15] 苏庆堂, 刘凡, 王环英, 等. 一种新型的基于矩阵 Schur 分解的数字水印方法: 中国, 106204410A[P]. 2016-12-07.
SU Qing-tang, LIU Fan, WANG Huan-ying, et al. A New Digital Watermarking Method Based on Matrix Schur Decomposition: China: 106204410A[P]. 2016-12-07.
- [16] SU Q, NIU Y, LIU X, et al. Embedding Color Watermarks in Color Images Based on Schur Decomposition[J]. Optics Communications, 2012, 285(7): 1792—1802.
- [17] SU Qing-tang. Research on Blind Watermarking Scheme of Digital Color Image[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2013.
- [18] 闻武, 左凌轩. 基于视觉感知的彩色图像质量评价[J]. 电脑知识与技术, 2017, 13(2): 186—188.
WEN Wu, ZUO Ling-xuan. Color Image Quality Evaluation Based on Visual Perception[J]. Computer Knowledge and Technology, 2017, 13(2): 186—188.