



## 一种适用于QR码的彩色图像数字水印算法

沈艳冰, 杨阳, 李竹

引用本文:

沈艳冰, 杨阳, 李竹. 一种适用于QR码的彩色图像数字水印算法[J]. 智能系统学报, 2020, 15(5): 949–955.

SHEN Yanbing, YANG Yang, LI Zhu. Digital watermarking algorithm for color images on QR codes[J]. *CAAI Transactions on Intelligent Systems*, 2020, 15(5): 949–955.

在线阅读 View online: <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201903016>

## 您可能感兴趣的其他文章

### 基于改进的稀疏表示和PCNN的图像融合算法研究

Image fusion based on the improved sparse representation and PCNN

智能系统学报. 2019, 14(5): 922–928 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201805045>

### 一种恢复图像自然色彩的重构方法

Reconstruction method for restoring the natural color of an image

智能系统学报. 2019, 14(5): 877–881 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201805011>

### 一种快速鲁棒核空间图形模糊聚类分割算法

A fast and robust clustering segmentation algorithm for kernel space graphics

智能系统学报. 2019, 14(4): 804–811 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201806045>

### 金属腐蚀区域图像增强算法研究

Image enhancement algorithm in metal corrosion area

智能系统学报. 2019, 14(2): 385–392 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201712024>

### 一种新融合算法的维吾尔族人脸识别

A new fusion algorithm for uyghur face recognition

智能系统学报. 2018, 13(3): 431–436 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201710014>

### 基于图像森林变换的灰度目标周长估算

Perimeter estimation of target object boundary based on IFT

智能系统学报. 2017, 12(3): 341–347 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201704019>

微信公众平台



关注微信公众号, 获取更多资讯信息

DOI: 10.11992/tis.201903016

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1538.TP.20200320.1038.010.html>

# 一种适用于 QR 码的彩色图像数字水印算法

沈艳冰, 杨阳, 李竹

(山西师范大学物理与信息工程学院, 山西 临汾 041004)

**摘要:** 针对彩色图像数字水印算法存在鲁棒性能差的缺陷, 提出一种适用于 QR 码的彩色图像数字水印算法。将彩色载体图像从 RGB 空间转换到 YCrCb 空间, 提取其 Y 分量并实施三级 DWT、DCT 和 SVD 操作获取对角矩阵; 利用加性规则将实施 Logistic 映射和 Arnold 变换后的 QR 码嵌入对角矩阵中。实验结果表明: 嵌入 QR 码的彩色图像 PSNR 值为 59.491 9, 经过噪声、压缩、旋转、对比度变化等攻击后, 其 PSNR 值和 NC 值分别稳定在 30 和 0.98 以上, 提取的 QR 码都可通过手机扫描识别, 解决了抗攻击能力差的缺陷。

**关键词:** 彩色图像; QR 码; Logistic 映射; Arnold 变换; 离散小波变换; 离散余弦变换; 奇异值分解; 鲁棒性  
**中图分类号:** TP309   **文献标志码:** A   **文章编号:** 1673-4785(2020)05-0949-07

中文引用格式: 沈艳冰, 杨阳, 李竹. 一种适用于 QR 码的彩色图像数字水印算法 [J]. 智能系统学报, 2020, 15(5): 949-955.

英文引用格式: SHEN Yanbing, YANG Yang, LI Zhu. Digital watermarking algorithm for color images on QR codes[J]. CAAI transactions on intelligent systems, 2020, 15(5): 949-955.

## Digital watermarking algorithm for color images on QR codes

SHEN Yanbing, YANG Yang, LI Zhu

(School of Physics and Information Engineering, Shanxi Normal University, Linfen 041004, China)

**Abstract:** Aiming at the poor robust performance of digital watermarking algorithms for color images, we propose a digital watermarking algorithm for color images applied to QR codes. A color carrier image is converted from RGB space to YCrCb space, in which the Y component is extracted and three-level discrete wavelet transform, discrete cosine transform, and singular value decomposition operations are gradually implemented to obtain the diagonal matrix; the QR code watermarking image implemented by a logistic chaotic map and an Arnold transform is successively embedded in the diagonal matrix through additive rules. The experimental results show that the peak signal-to-noise ratio (PSNR) value of the color image embedded with the QR code is 59.491 9. After the attacks of noises, compression, rotation, and contrast change, the PSNR and normalized correlation values are stably above 30 and 0.98, respectively. The extracted QR codes can be recognized by mobile phone scanning, which solves the poor anti-attack capability.

**Keywords:** color image; QR code; Logistic chaotic mapping; Arnold transform; DWT; DCT; SVD; robustness

数字水印可根据水印嵌入方式的不同分为空间域水印和变换域水印。前者是将水印信息直接嵌入载体图像像素中, 后者是对载体图像做适当变换后嵌入水印信息。由于后者具有更强的抗攻击能力且鲁棒性能较优, 通常选择后者。快速响应二维码 (quick response code, QR 码), 是二维条码的一种, 通过扫描可以迅速获得其所携带的信息, 主要特点是自身容量大、纠错能力强<sup>[1]</sup>。如果

将 QR 码作为水印信息嵌入变换域中, 则能够增加水印信息的嵌入量和加强水印算法的鲁棒性<sup>[2]</sup>。

Zhang 等<sup>[3]</sup> 提出对载体图像实施一级离散小波变换 (discrete wavelet transform, DWT), 选择其低频子图实施  $8 \times 8$  分块, 再进行离散余弦变换 (discrete cosine transform, DCT), 并从  $4 \times 4$  左上变换系数矩阵中提取组织新的矩阵实施奇异值分解 (singular value decomposition, SVD) 操作获得对角矩阵, 最后在对角矩阵中嵌入水印。由实验数据可知, 鲁棒性较强, 但实验选取的载体图像非

收稿日期: 2019-03-16. 网络出版日期: 2020-03-20.

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目 (61503231).

通信作者: 李竹. E-mail: [slizhu@126.com](mailto:slizhu@126.com).

彩色图像, 水印图像非 QR 码, 因此实用性不足且嵌入量较小。徐江峰等<sup>[4]</sup>提出对载体图像进行 DWT 操作, 并对其低高频子带进行  $4 \times 4$  分块 DCT 操作, 将混沌加密后的 QR 码水印嵌入其中, 实验选取的载体图像非彩色图像, 实用性不强, 在高斯噪声攻击和 JPEG 压缩攻击上, 归一化相关系数(normalized correlation, NC)值略低。因此, 鉴于以上问题, 本文提出一种适用于 QR 码的彩色图像数字水印算法, 该方案通过对 QR 码实施 Logistic 映射和 Arnold 变换来完成双重加密, 用以增强水印的安全性能; 对彩色载体图像从 RGB 空间转换到 YCbCr 空间, 使用 DWT、DCT 和 SVD 技术在其亮度分量图中嵌入 QR 码, 用来提高水印的嵌入量、不可见性和鲁棒性。

## 1 QR 码水印的处理

### 1.1 Logistic 映射

Logistic 映射的定义为

$$x_{k+1} = ux_k(1 - x_k)$$

式中:  $0 \leq u \leq 4$ ;  $x_k \in (0, 1)$ ,  $k = 0, 1, 2, \dots$ ;  $u$  为 Logistic 的参数,  $u$  的取值影响映射的效果, 当  $3.569\,945\,6 \leq u \leq 4$  时, Logistic 映射处在混沌的状态<sup>[5]</sup>;  $x_k$  为映射前的状态;  $x_{k+1}$  为映射后的状态。初值  $x$  的选择对图像的映射效果也有影响。本文对 QR 码进行加密是通过实施 logistic 映射来完成的, 参数  $u$  为 4, 初始值  $x$  为 0.2345。

### 1.2 Arnold 变换

Arnold 变换实现加密的手段是将图像的像素点进行置乱<sup>[6]</sup>。二维 Arnold 置乱为

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 11 & 12 \\ 12 & 5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \pmod{N}$$

式中:  $x, y \in \{0, 1, \dots, N-1\}$ ;  $(x, y)$  表示置乱前的具体像素坐标;  $(x', y')$  表示置乱后的具体像素坐标;  $N$  为图像矩阵的阶数, 代表着图像的像素;  $\text{mod}()$  是取模运算。

图像实施  $T$  次 Arnold 操作后回到初始状态的特性称为 Arnold 置乱的周期性, 且周期  $T$  与图像的像素大小  $N \times N$  有关系。本文中 QR 码像素为  $64 \times 64$ , 置乱周期为 48, 当 QR 码实施 30 次 Arnold 操作后达到一定置乱状态进而实现加密, 由 Arnold 的周期性可知, 再对其实施 18 次 Arnold 操作即可恢复到原 QR 码。

## 2 彩色载体图像的处理

彩色载体图像的处理需要 DWT、DCT 和 SVD。它们的结合均衡了水印的不可见性和鲁棒性。

### 2.1 离散小波变换(DWT)

对原始彩色图像进行处理, 即从 RGB 颜色空

间到 YCrCb 颜色空间, 提取 YCrCb 空间的 Y 分量, 会得到一个灰度图像, 对其进行小波变换, 经过 1 级 DWT 后的灰度图像会分解为 LL、LH、HL、HH 4 个大小相等的子图, 且在之后的小波变换中, 低频子图采用如上完全相同的方式进行变化, 生成更小的子图, 小波变换分解图见图 1<sup>[7-8]</sup>。从图 1 中可看出, 经过 3 级 DWT 后, 生成了 10 个子图, 其中,  $LL_2$  为低频子图, 其余均为高频子图, 低频子图代表了灰度图像的基本特征和大部分能量, 高频子图体现了原灰度图像的细节部分, 如边缘、纹理等<sup>[9]</sup>。

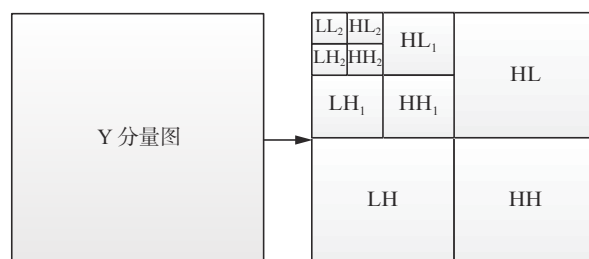


图 1 小波变换分解

Fig. 1 Decomposition diagram of wavelet transform

由于低频分量代表灰度图像的基本特征, 如果将水印嵌入低频子图  $LL_2$  中, 不仅具有抵抗压缩攻击的能力, 并且能够有效地提取水印, 使得水印的鲁棒性较强<sup>[10]</sup>。

### 2.2 离散余弦变换(DCT)

离散余弦变换又叫作 DCT 变换, 经过该变换得到的 DCT 系数相关性较空间域降低, 主要信号能量聚集在左上角几个低频变换系数上<sup>[11]</sup>。DCT 算法具有很强的抗干扰能力, 图像遭受攻击后会有一定的失真, 但是主要信息还存在, 嵌入的水印信息依然可以提取出来。目前在水印算法中有 2 种 DCT 变换方式, 其一是将像素大小为  $M \times N$  的图像看作是一个二维矩阵, 对此矩阵直接实施 DCT 变换, 将水印嵌入其中; 另一种是将大小为  $M \times N$  的图像分割成  $X$  个小块, 生成  $X$  个二维矩阵, 对  $X$  个二维矩阵分别进行 DCT 变换, 将水印嵌入其中。本文采用的 DCT 变换方式是第一种, 像素大小为  $512 \times 512$  的 Y 分量图进行 3 级 DWT 后, 可以得到一个  $64 \times 64$  的低频子图, 对该图实施 DCT 变换, 可以得到  $64 \times 64$  的矩阵用于水印的嵌入。

### 2.3 奇异值分解(SVD)

奇异值分解是一种正交变换, 可以将矩阵对角化。假设一幅图像  $A$  的大小为  $M \times N$ , 则可以看作是  $M \times N$  的矩阵。那么  $A$  的奇异值分解定义为

$$A = USV^T$$

式中:  $U$  和  $V$  均为正交矩阵;  $S$  为对角矩阵, 且非

对角线上的元素均为0, 对角线上的元素满足  $S_1 \geq S_2 \geq \dots \geq S_r \geq S_{r+1} = \dots = S_n = 0$  ( $r$  是  $A$  的秩)<sup>[12-13]</sup>。

本文选用奇异值分解主要有2个原因: 1) 由于图像的奇异值比较稳定, 使其在遭受攻击时, 奇异值变化不至于过大, 有助于提高水印的攻击能力<sup>[14-17]</sup>; 2) 图像的本质特征是由奇异值体现的, 并非视觉特征<sup>[18-20]</sup>。低频子图经过DCT变换后, 会得到  $64 \times 64$  的矩阵, 对其实施奇异值分解, 可以使得水印的不可见性和鲁棒性较强。

### 3 水印的嵌入和提取

本文选用QR码为水印图像, 彩色图像为载体图像。采用QR码使得水印嵌入量增大和鲁棒性增强。图2为水印算法的总框架。

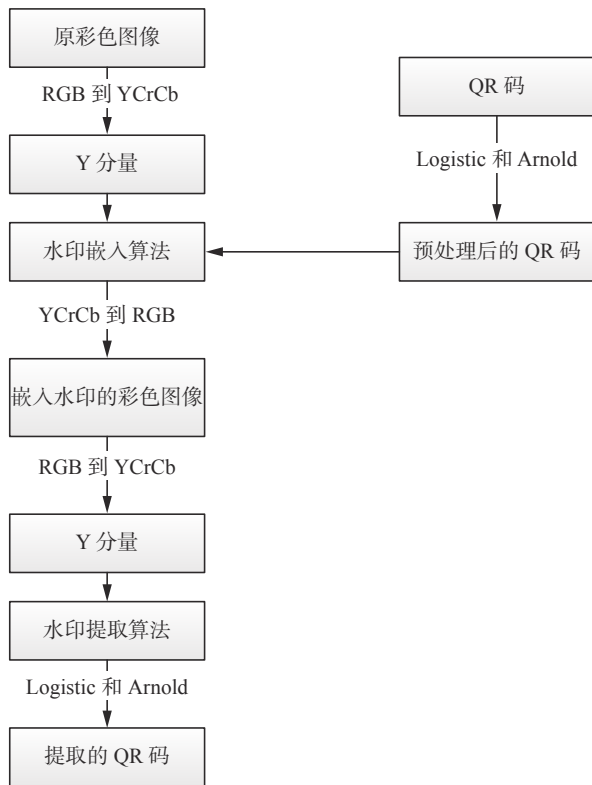


图2 水印算法的总框架

Fig. 2 The overall framework of the watermarking algorithm

#### 3.1 水印的嵌入

1) 对QR码先实施Logistic映射, 后进行Arnold操作, 获得双重加密后的QR码序列  $W$ ;

2) 把彩色载体图像从RGB空间转换到YCbCr空间, 提取其Y分量得到亮度分量图;

3) 对亮度分量图实施3级DWT, 获得低频子图LL, 对LL实施DCT变换, 即  $dct = dct2(LL)$ , 得到变换后dct系数矩阵;

4) 对dct系数矩阵实施奇异值分解, 即  $[U, S, V] = SVD(dct)$ , 引入强度因子  $\alpha$ , 利用加性法则嵌入

QR码信息, 为

$$W\alpha = S + \alpha W$$

式中:  $S$  为嵌入QR码前的对角矩阵;  $W$  为QR码信息;  $W\alpha$  为嵌入QR码后的对角矩阵;  $\alpha$  为强度因子, 随着  $\alpha$  的增大, 不可见性变差, 相似度增加, 经过多次实验, 确定该算法中  $\alpha = 60$ 。

5) 对  $W\alpha$  矩阵实施奇异值分解, 即  $[U_1, S_1, V_1] = SVD(W\alpha)$ , 利用  $U$ 、 $S_1$ 、 $V$  完成奇异值重构, 即  $dct1 = US_1V$ 。最后实施DCT逆变换和3级小波逆变换, 获得嵌入QR码的亮度分量图。

6) 将嵌入QR码的亮度分量图从YCbCr空间转换到RGB空间, 最终获得嵌入QR码的彩色载体图像。

#### 3.2 水印的提取

1) 将嵌入QR码的彩色载体图像从RGB空间转换到YCbCr空间, 提取其Y分量获得亮度分量图;

2) 对亮度分量图实施3级DWT, 获得低频子图  $LL_1$ , 对  $LL_1$  实施DCT变换, 即  $dct2 = dct2(LL_1)$ , 得到dct系数矩阵;

3) 对dct系数矩阵实施奇异值分解,  $[U_2, S_2, V_2] = SVD(dct2)$ , 将  $U_1, S_2, V_1$  进行逆奇异值变换, 即  $SS = U_1 S_2 V_1$ ;

4) 利用  $S, SS, \alpha$  提取双层加密后的QR码, 即  $W_b = (SS - S) / \alpha$ , 可以得到水印信息;

5) 建立一个新的空矩阵  $W_c$  用于存放水印信息, 当发现水印信息时, 将其存入矩阵  $W_c$  中, 因此, 可得到加密后的QR码序列  $W_e$ 。

6) 将QR码序列  $W_e$  实施解密操作, 先实施Arnold变换, 再实施Logistic映射, 获得最终提取的QR码水印  $W_w$ 。

## 4 实验结果分析

#### 4.1 水印评价标准

1) 该实验中, 嵌入QR码的图像与未嵌入的原始图像之间的区别由峰值信噪比 (peak signal-to-noise ratio, PSNR) 来衡量。均方误差 (mean-square error, MSE)、峰值信噪比PSNR的表达式为

$$MSE = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^N [I'(i, j) - I(i, j)]^2 \quad (1)$$

$$PSNR = 10 \log \frac{255^2 \times 3}{E_{MES}(R) + E_{MES}(G) + E_{MES}(B)} \quad (2)$$

式中:  $I$  为原始彩色图像;  $I'$  为含QR码的彩色图像。不可见性随着PSNR值的增加而增加, 当PSNR > 30 dB时, 表明该算法的不可见性较优。



2) 提取出的 QR 码与原 QR 码之间的相似性由归一化相关系数 NC 来衡量, 为

$$NC = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N w(i, j) w'(i, j)}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N w^2(i, j)} \quad (3)$$

式中:  $w$  表示原始 QR 码图像;  $w'$  表示提取出的 QR 码图像。相似性随着 NC 值的增加而增加, 当 NC 值靠近 1 时, 说明提取出的 QR 码与原始 QR 码之间的相似性较强。

#### 4.2 实验结果分析

本测试以彩色图像为载体图像, 像素为  $512 \times 512$ , 以携带“山西师范大学沈艳冰”信息的 QR 码为水印图像, 像素为  $64 \times 64$ , Logistic 映射参数  $u$  为 4, 初始值  $x$  为 0.2345, Arnold 置乱周期为 48, 置乱次数为 30, 强度因子  $\alpha$  的值为 60。

##### 4.2.1 未受攻击的实验结果

图 3(a) 为彩色载体图像, 图 3(b) 为加入 QR 码的彩色载体图像, 图 3(c) 为原 QR 码, 图 3(d) 为提取的 QR 码。比较图 3(a) 和图 3(b), 用式 (1) 和 (2) 可以算出本算法 PSNR 值为 59.4919, 说明本算法不可见性较好。比较图 3(c) 和图 3(d), 用式 (3) 可以算出本算法 NC 值为 1, 说明该算法能提取完整的 QR 码和识别 QR 码。



图 3 未受攻击的实验结果

Fig. 3 Unattacked experimental results

##### 4.2.2 受攻击的实验结果

检验算法鲁棒性的方法是对嵌入 QR 码的彩色图像施加攻击。表 1~5 列举了 10 种攻击, 分别为 JPEG 压缩、图像变暗、图像增亮、对比度降低、对比度增加、高斯噪声、盐椒噪声、乘积噪声、剪切和旋转攻击。

表 1 JPEG 压缩测试结果

Table 1 JPEG compression test results

攻击类型	PSNR	NC	提取的水印图像
JPEG压缩70%	46.193 0	1.000 0	
JPEG压缩50%	45.327 6	1.000 0	
JPEG压缩40%	44.985 7	1.000 0	
JPEG压缩30%	44.495 4	1.000 0	
JPEG压缩10%	41.497 1	0.998 5	

表 2 图像对比度和明暗变化测试结果

Table 2 Test results of image contrast and brightness changes

攻击类型	PSNR	NC	提取的水印图像
图像变暗 (0,0.85)	34.132 6	0.986 6	
图像增亮 (0.4,1)	35.036 7	0.984 1	
对比度降低 (0.2,0.8)	33.751 1	0.984 1	
对比度增加 (0.3,0.6)	32.733 9	0.981 2	

表 3 噪声测试结果


Table 3 Noise test results

攻击类型	PSNR	NC	提取的水印图像
高斯噪声0.01	35.110 6	0.996 0	
高斯噪声0.02	34.032 7	0.994 5	
高斯噪声0.04	33.307 1	0.993 1	
盐椒噪声0.05	41.102 2	0.994 0	
盐椒噪声0.10	38.346 0	0.992 1	
盐椒噪声0.15	36.740 2	0.990 6	
乘积噪声0.01	38.521 6	0.999 0	
乘积噪声0.05	34.691 4	0.995 0	

表4 剪切测试结果  
Table 4 Shear test results

攻击类型	PSNR	NC	提取的水印
剪切1/256	55.5130	0.9975	
剪切1/128	53.5223	0.9995	
剪切1/64	51.4531	0.9985	
剪切1/32	49.5802	0.9985	
剪切1/16	47.6258	0.9945	
剪切1/8	46.3956	0.9921	

表5 旋转测试结果  
Table 5 Rotation test results

攻击类型	PSNR	NC	提取的水印图像
旋转5度	36.4553	0.9901	
旋转10度	34.9748	0.9876	
旋转30度	33.6167	0.9886	
旋转50度	33.3834	0.9876	
旋转70度	33.3288	0.9856	

#### 1) JPEG 压缩测试

由表1可看出,在JPEG压缩实验中,即使JPEG压缩至10%也可以提取出可识别的有效QR码,且NC值在0.998以上,说明该算法在JPEG压缩上有很强的鲁棒性。

#### 2) 图像对比度和明暗变化测试

从表2测试结果可得,无论是图像明暗变化或是对比度变化,提取的QR码的PSNR值和NC值都可以保持较高数值,且NC值始终保持在0.98以上。由此可以得知该算法可以抵抗图像明暗变化 and 对比度变化,有较强的抗攻击能力。

#### 3) 噪声测试

通过表3可看出,对嵌入QR码的彩色图像添加高斯噪声(方差各为0.01、0.02、0.04)、盐椒噪声(噪声密度各为0.05、0.10、0.15)以及乘积噪声

(方差各为0.01、0.05),受噪声攻击后的PSNR值和NC值仍各自保持在30和0.90以上,提取的QR码都能识别其携带原始信息,这说明该算法鲁棒性较好,可以有效抵抗噪声攻击。

#### 4) 剪切测试

由表4测试结果可看到,对QR码进行剪切时,即使剪切1/8,其PSNR值和NC值也不会发生很大的变化,分别保持在40和0.99以上,QR码仍可以提取并识别。通过该测试可知该算法能抵抗剪切,鲁棒性性能较优。

#### 5) 旋转测试

由表5旋转测试结果可知,该算法可以抵抗旋转,当旋转达到70°时QR码水印仍然可以提取并识别,且NC值保持在0.98以上。

#### 4.2.3 与其他算法相比较的实验结果

彩色图像由RGB空间转换到YCrCb空间,提取Y分量进行水印嵌入算法,Y分量图为灰度图像,因此,该算法也适合于灰度图像。文献[4]使用灰度图像进行鲁棒性实验,所以本文选择与文献[4]进行对比实验,表6为本文与文献[4]的实验结果比较。由表6中数据可以看出,本文在高斯噪声参数为0.01、0.02和0.04的攻击上的NC值分别为0.9960、0.9945和0.9931;在JPEG压缩参数为30%、50%、70%的攻击上的NC值分别为1.0000、1.0000和1.0000;在剪切1/8的攻击上的NC值为0.9921,在中值滤波[3,3]的攻击上的NC值为0.9990,均高于文献[4]中的NC值,由此可知本文算法在高斯噪声、JPEG压缩、剪切和中值滤波下,相比于文献[4]的算法,鲁棒性更优。

表6 本文与文献[4]的实验结果比较

Table 6 Comparison of experimental results between this article and literature [4]

攻击类型	本文算法	文献[4]
高斯噪声0.01	0.9960	0.9413
高斯噪声0.02	0.9945	0.9371
高斯噪声0.04	0.9931	0.9300
JPEG压缩30%	1.0000	0.9873
JPEG压缩50%	1.0000	0.9893
JPEG压缩70%	1.0000	0.9985
剪切1/8	0.9921	0.9374
中值滤波[3,3]	0.9990	0.9873

## 5 结束语

提出一种适用于QR码的彩色图像数字水印

算法。对 QR 码实施 Logistic 映射和 Arnold 变换,对彩色载体图像实施 DWT、DCT 和 SVD 操作,实现了不可见性和鲁棒性之间的均衡。实验数据表明:该算法经过 JPEG 压缩、图像亮暗变化、对比度变化、噪声、剪切和旋转后的彩色图像 PSNR 值均在 30 以上,提取出的 QR 码 NC 值均在 0.98 以上,且清晰可见,都能通过手机扫描识别。并与文献 [4] 相比较,该算法在噪声、JPEG 压缩、剪切和滤波攻击上有一定提升,因此,该算法鲁棒性和实用性较强。

## 参考文献:

- [1] 王晓红, 孙业强. 基于 QR 分解的强鲁棒性双彩色盲水印算法 [J]. 光电子·激光, 2017, 28(9): 1016–1024.  
WANG Xiaohong, SUN Yeqiang. Robust dual color blind watermarking algorithm based on QR decomposition[J]. Journal of optoelectronics·laser, 2017, 28(9): 1016–1024.
- [2] 王子煜, 孙刘杰, 李孟涛. 强鲁棒性 QR 码水印技术 [J]. 包装工程, 2012, 33(15): 84–87.  
WANG Ziyu, SUN Liujie, LI Mengtao. QR code watermark technology with strong robustness[J]. Packaging engineering, 2012, 33(15): 84–87.
- [3] ZHANG Zhi, WANG Chengyou, ZHOU Xiao. Image watermarking scheme based on Arnold transform and DWT-DCT-SVD[C]//Proceedings of the 2016 IEEE 13th International Conference on Signal Processing. Chengdu, China, 2016: 805–810.
- [4] 徐江峰, 张守强. 基于 QR 码的 DWT-DCT 数字水印算法 [J]. 计算机应用研究, 2018, 35(5): 1540–1544.  
XU Jiangfeng, ZHANG Shouqiang. Algorithm of DWT-DCT digital watermarking based on QR code[J]. Application research of computers, 2018, 35(5): 1540–1544.
- [5] 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 Nuoran, LYU Xiaoqi, GU Yu, et al. Blind watermarking algorithm for color image in contourlet domain based on QR code and chaotic encryption[J]. Packaging engineering, 2017, 38(15): 173–178.
- [6] 王晓红, 魏代海, 刘玄玄, 等. 一种彩色 QR 码嵌入彩色图像的数字水印技术 [J]. 光电子·激光, 2016, 27(10): 1094–1100.  
WANG Xiaohong, WEI Daihai, LIU Xuanxuan, et al. Digital watermarking technique of color image based on color QR Code[J]. Journal of optoelectronics·laser, 2016, 27(10): 1094–1100.
- [7] JANE O, ELBAŞI E, İLK H G. Hybrid non-blind watermarking based on DWT and SVD[J]. Journal of applied research and technology, 2014, 12(4): 750–761.
- [8] THIND D K, JINDAL S. A semi blind DWT-SVD video watermarking[J]. Procedia computer science, 2015, 46: 1661–1667.
- [9] 王世辉, 王仪明, 武淑琴, 等. 萤火虫算法优化的多波域图像水印技术 [J]. 微电子学与计算机, 2018, 35(5): 124–127, 132.  
WANG Shihui, WANG Yiming, WU Shuqin, et al. A watermarking method in wavelet domain optimized by firefly algorithm[J]. Microelectronics and computer, 2018, 35(5): 124–127, 132.
- [10] 孔玲君, 聂鹏. 一种基于 DWT-DCT 变换域的全息水印技术 [J]. 光电子·激光, 2016, 27(2): 198–202.  
KONG Lingjun, NIE Peng. A holographic digital watermarking technology based on DWT-DCT transform domain[J]. Journal of optoelectronics·laser, 2016, 27(2): 198–202.
- [11] 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 Yajian, 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.
- [12] 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 Yeqiang, WANG Xiaohong, LI Xiaohu. Double color blind watermarking algorithm based on QR Code and DWT-SVD[J]. Packaging engineering, 2017, 38(11): 193–198.
- [13] ALI M, AHN C W, PANT M. A robust image watermarking technique using SVD and differential evolution in DCT domain[J]. Optik, 2014, 125(1): 428–434.
- [14] 吴军, 孙像军, 李慧慧. 一种基于彩色图像的双重水印算法 [J]. 电视技术, 2018, 42(2): 101–109, 114.  
WU Jun, SUN Xiangjun, LI Huihui. A dual watermarking algorithm based on color image[J]. Video engineering, 2018, 42(2): 101–109, 114.
- [15] 汤永利, 张亚萍, 高玉龙, 等. 基于 DWT-SVD 压缩量化的数字图像盲水印算法 [J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2018, 30(2): 265–271.  
TANG Yongli, ZHANG Yaping, GAO Yulong, et al. Compression quantitative digital image blind watermark-

- ing algorithm based on DWT-SVD[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2018, 30(2): 265–271.
- [16] 肖振久, 郭冰莹, 李南, 等. 一种基于 Slant 变换和 SVD 的稳健性数字水印算法 [J]. 计算机工程与科学, 2018, 40(10): 1772–1779.
- XIAO Zhenjiu, GUO Bingying, LI Nan, et al. A robust digital watermarking algorithm based on Slant transform and SVD[J]. Computer engineering and science, 2018, 40(10): 1772–1779.
- [17] 陈青, 郭功勋. 一种基于模运算的小波系数调整水印算法 [J]. 小型微型计算机系统, 2019, 40(2): 395–400.
- CHEN Qing, GUO Gongxun. Wavelet coefficient adjustment watermark algorithm based on modular arithmetic[J]. Journal of Chinese computer systems, 2019, 40(2): 395–400.
- [18] 任克强, 梁亮亮, 喻玲娟. SVD 与 HVS 相结合的小波域数字图像鲁棒水印 [J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(6): 869–875.
- REN Keqiang, LIANG Liangliang, YU Lingjuan. Robust digital image watermarking in wavelet domain based on SVD and HVS[J]. Journal of electronic measurement and instrumentation, 2017, 31(6): 869–875.
- [19] 姚军财. 基于小波变换和奇异值分解的图像水印算法研究 [J]. 光学技术, 2017, 43(5): 439–444.
- YAO Juncai. Image watermark algorithm base on the discrete wavelet transform and singular value decomposition[J]. Optical technique, 2017, 43(5): 439–444.
- [20] 曲长波, 于智龙, 李栋栋. 基于分块 FRIT-SVD 的鲁棒零水印算法 [J]. 计算机工程与科学, 2018, 40(6): 1005–1016.
- QU Changbo, YU Zhilong, LI dongdong. A robust zero-watermarking algorithm based on the block FRIT-SVD[J]. Computer engineering and science, 2018, 40(6): 1005–1016.

#### 作者简介:



沈艳冰, 硕士研究生, 主要研究方向为图像处理和信号处理。



杨阳, 硕士研究生, 主要研究方向为图像处理和信号处理。



李竹, 副教授, 主要研究方向为通信与信息系统和信号处理。主持省级科研项目 1 项, 授权发明专利 2 项。发表学术论文 20 篇。