

基于 QR 码的自适应抗打印扫描水印算法

王春霞¹, 王晓红¹, 孙业强¹, 肖颖², 丁桂芝³, 章婷³

(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;

3.上海市印刷行业协会, 上海 200093)

摘要: **目的** 提出一种基于 QR 码的自适应抗打印扫描盲水印算法。**方法** 首先对载体 QR 码进行三级小波变换, 并对低频部分进行 4×4 分块 Schur 分解, 然后利用子块酉矩阵的系数差值的稳定性, 将二值水印信息自适应嵌入到载体 QR 码中, 最后对含水印 QR 码打印扫描并提取出水印信息。同时, 算法实现了盲提取。**结果** 算法能较好抵抗打印扫描攻击, 并对高斯噪声、椒盐噪声、斑纹噪声、泊松噪声、JPEG 压缩等攻击具有较强的鲁棒性。**结论** 算法具有较强的抗打印扫描性能, 可以广泛应用于数字产品的版权保护。

关键词: QR 码; 水印; DWT 变换; Schur 分解; 抗打印扫描

中图分类号: TS801.3; TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)21-0186-05

Adaptive Watermarking Algorithm Resistant to Printing and Scanning Based on QR Code

WANG Chun-xia¹, WANG Xiao-hong¹, SUN Ye-qiang¹, XIAO Ying², DING Gui-zhi³, ZHANG Ting³

(1.University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2.Shanghai Publishing and Printing College, Shanghai 200093, China; 3.Shanghai Printing Trade Association, Shanghai 200093, China)

ABSTRACT: The work aims to propose an adaptive blind watermarking algorithm resistant to printing and scanning based on QR code. Firstly, the carrier QR code was processed by three-level DWT transform and the low-frequency part was subject to 4×4 block Schur decomposition. Then, the binary watermarking information was adaptively embedded into the carrier QR code based on a stable coefficient difference of sub-block U matrix. Finally, the watermarking information was extracted from the QR code which was printed and scanned. Meanwhile, the algorithm was blindly extracted. The experimental results showed that the algorithm could better resist print-scan attack, and it had higher robustness in resisting the attacks like Gaussian noise, salt and pepper noise, speckle noise, Poisson noise and JPEG compression. With strong performance in resisting prin-scan attack, the algorithm can be widely applied in the copyright protection of digital products.

KEY WORDS: QR code; watermarking; DWT transform; Schur decomposition; resistant to printing and scanning

近年来, QR 码广泛应用于电子客票服务、物流、邮政等领域^[1-2], 随着打印扫描设备的发展, QR 码极易被复制, 需要保证其信息安全。数字水印技术具有不可见性好, 安全性高等特点^[3-4], 因此如何用数字水印技术来解决 QR 码的抗打印扫描问题成为当前研究热点。

目前, 已经提出了很多抗打印扫描的数字水印算法, 取得了很大进展, 但仍然存在很多不足。2014

年 MIRZA M T 等^[5]提出了基于混合域的水印嵌入方法, 将水印嵌入到空域和傅立叶变换域中, 具有较强的抗压缩和旋转等攻击, 但是抗打印扫描能力不够好, 有待进一步提高。2015 年郭倩等^[6]提出了基于 DCT-SVD 的双 QR 码水印防伪算法, 利用奇异值分解将水印嵌入到图像 DCT 域, 对一般攻击具有较强的鲁棒性, 但对抵抗打印扫描的能力仍然有限。2016

收稿日期: 2017-04-24

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

作者简介: 王春霞 (1993—), 女, 硕士, 上海理工大学硕士生, 主攻为数字图像处理。

通讯作者: 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。

年谢勇等^[7]提出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。为了更好的满足实际需要,解决现有水印算法普遍存在抵抗打印扫描能力不强的问题,文中提出一种基于 QR 码的自适应抗打印扫描水印算法。

1 基础原理

1.1 QR 码

QR 码即快速识别矩阵码。结构包括编码区域和含有寻像图像、分隔符、定位图形、校正图形的功能图形。QR 码不仅具有一般性条码的特点,而且具有独到的特性。其信息容量大,读取速度快,识读方位达 360°,且纠错功能很强。QR 码的纠错等级分为 L, M, Q, H 这 4 个等级^[8-10]。

1.2 离散小波变换 (DWT)

离散小波变换是一种时频局域变换,可以在不同尺度上分析信号。离散小波变换经过一层分解得到 4 个子带,分别为:水平中频子带 (HL)、垂直中频子带 (LH)、对角高频子带 (HH) 和低频子带 (LL)。图像的大部分能量集中在低频区域,高频区域主要反映图像的细节信息。由于打印扫描对图像影响较小的是低频信息,高频信息容易产生失真并丢失,所以将水印信息嵌入到三级小波变换的低频分量中,从而增强水印的鲁棒性^[11-12]。

1.3 Schur 分解

Schur 分解是一种矩阵分解方法^[13-14]。根据文献 [13],对非负矩阵 4×4 分块 Schur 分解得到 4×4 的 U 矩阵,其中第 2 行第 1 列元素和第 3 行第 1 列元素的差值稳定,利用这种稳定性进行水印的嵌入与盲提取。

Schur 分解定义如下:

设矩阵 $A \in C^{n \times n}$,则存在酉矩阵 $U \in C^{n \times n}$,使得:

$$A = UTU^{\perp} = U(D+B)U^{\perp} \quad (1)$$

式中: D 为特征值对角阵; B 为上三角阵; $U^{\perp}$ 为 U 矩阵的转置矩阵。

相较于 SVD 分解的时间复杂度 $O(11N^3)$, Schur 分解的时间复杂度更低,仅 $O(8N^3/3)$,算法效率更高。

2 水印嵌入和提取算法

2.1 水印嵌入算法

1) 将 QR 码载体图像进行三级小波变换,小波基为 Haar。

2) 对三级低频子带分块 Schur 分解。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 $U_{i,j}$ 矩阵。

3) 生成取值范围 0~ a 的随机矩阵,再根据水印信息 $W_{i,j}$ 调节随机矩阵使其满足式 (2),构成审核矩阵 $Q_{i,j}$,审核矩阵的阈值为 $q=a/2$ 。

$$\begin{cases} Q_{i,j} \geq q, W_{i,j} = 1 \\ Q_{i,j} < q, W_{i,j} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

4) 嵌入水印信息。基于式 (3—4) 结合审核矩阵将水印信息嵌入到步骤 2) 得到的每一块 $U_{i,j}$ 矩阵中的水印信息。

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

$$W_{i,j} = 0, \begin{cases} U'_{2,1} = \text{sign}(U_{2,1}) \times (U_{\text{avg}} + \frac{t}{2} \times Q_{i,j}) \\ U'_{3,1} = \text{sign}(U_{3,1}) \times (U_{\text{avg}} - \frac{t}{2} \times Q_{i,j}) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $U_{2,1}$ 和 $U_{3,1}$ 分别为 $U_{i,j}$ 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。

5) 通过 Schur 逆变换和三级小波逆变换得到含水印信息 QR 码载体图像。水印嵌入流程见图 1。

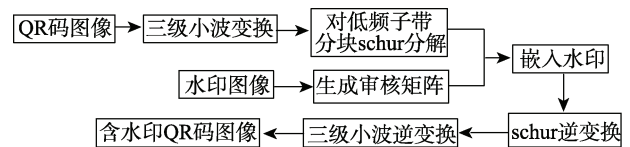


图 1 水印嵌入流程

Fig.1 Watermark embedding process

2.2 水印提取算法

1) 对含水印 QR 码图像进行三级小波变换。

2) 低频子带进行分块 Schur 分解得到每个子块的 $U'_{i,j}$ 矩阵。

3) 根据每块 $U'_{i,j}$ 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 (5)。

$$\begin{cases} W'_{i,j} = 1, |U'_{3,1}| \geq |U'_{2,1}| \\ W'_{i,j} = 0, |U'_{3,1}| < |U'_{2,1}| \end{cases} \quad (5)$$

式中: $W'_{i,j}$ 为提取的水印信息。

4) 对提取的水印进行双边滤波,二值化处理得到增强后最终水印。水印提取流程见图 2。

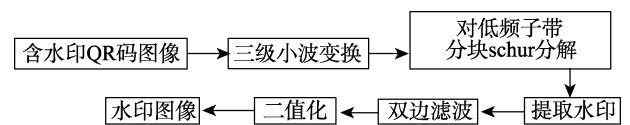


图 2 水印提取流程

Fig.2 Watermark extracting process

3 实验仿真与分析

实验采用 512×512 像素、纠错等级为 H 的 QR

码作为载体图像,采用 64×64 像素、标有“USST”字符的二值图作为水印图像。为验证算法的有效性,选取 2 个 QR 码进行实验,QR1 码载体信息为上海理工大学官网,QR2 码载体信息为上海理工大学出版印刷与艺术设计学院官网。采用归一化相关系数 NC 值^[15]对水印提取效果进行客观评价。载体图像及水印图像见图 3。



图 3 载体图像及水印图像

Fig.3 Carrier image and watermark image

3.1 抗打印扫描实验

打印扫描会对数字图像质量产生很大影响,为了增强水印抗打印扫描能力,取 $a=1, 2, 3, 4$ 进行实验确定合适的审核矩阵阈值 q 。如果水印嵌入强度过小,会使得含水印的 QR 码经过打印扫描后丢失大量信息而难以提取水印信息;如果嵌入强度过大,将会对原始载体 QR 码的质量产生一定影响,无法识别,因此选择水印强度 $t=0.5, 0.8, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8$ 进行实验确定最佳水印嵌入强度。打印扫描分辨率设置为 300 dpi,打印图像大小为 3 cm。现以载体 QR1 码为例,对打印扫描后提取的水印 NC 值进行分析,结果见图 4。

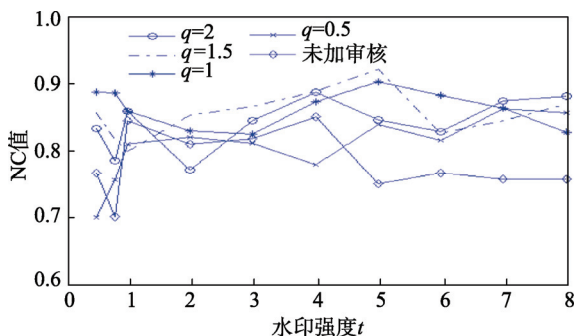


图 4 QR1 提取水印 NC 值

Fig.4 The NC values of watermark extracted by QR1

从图 4 可以看出,若直接嵌入水印,未加审核矩阵,提取水印 NC 值较低,该算法通过增加审核矩阵,自适应嵌入水印信息后,NC 值基本上保持在 0.8 以上,有很大提升。对不同的审核矩阵阈值 q 进行比较,可以发现当 q 值较小时,NC 值提升不大;当 q 值增大到 1.5 时,NC 值达到最高;继续增大 q 值为 2 时,NC 值反而有所降低,因此, $q=1.5$ 为最合适的审核矩阵阈值。对不同水印嵌入强度 t 进行比较,可以发现 $t=5$ 时,NC 值基本上比其他水印嵌入强度高。 $t=5$ 为最佳水印嵌入强度。具体的提取水印图及 NC 值见表 1 和表 2。

表 1 提取水印及 NC 值 ($t=5$)
Tab.1 Extracted watermark and the NC values ($t=5$)

审核矩阵阈值	提取水印图	NC 值
未加审核矩阵		0.750 733
$q=0.5$		0.839 687
$q=1$		0.901 799
$q=1.5$		0.921 271
$q=2$		0.846 531

从表 1 可以看出,当固定水印嵌入强度 $t=5$,审核矩阵阈值 $q=1.5$ 时提取水印效果最好,其 NC 值达到最大。

表 2 提取水印及 NC 值 ($q=1.5$)
Tab.2 Extracted watermark and the NC values ($q=1.5$)

水印嵌入强度	提取水印图	NC 值
$t=2$		0.853 372
$t=3$		0.866 08
$t=4$		0.888 563
$t=5$		0.921 271
$t=6$		0.826 002
$t=7$		0.844 575
$t=8$		0.869 99

从表 2 可以看出,当固定审核矩阵阈值 $q=1.5$,水印嵌入强度 $t=5$ 时提取水印效果最好,其 NC 值达到最高。

3.2 攻击实验

为了测试文中算法的鲁棒性,所设定的审核矩阵阈值 q 为 1.5,水印嵌入强度 t 为 5,进行攻击实验。以 QR1 为例,实验结果见表 3。

由表 3 可知,当含水印载体图像遭受攻击时,所提取水印 NC 值都在 0.96 以上。当图像经过输出打印扫描后,再对其进行攻击,所提取水印 NC 值虽然有所

表 3 水印攻击实验结果
Tab.3 Experimental results of watermarking attacks

攻击类型	打印扫描前		打印扫描后		增强后	
	提取水印	NC 值	提取水印	NC 值	提取水印	NC 值
高斯噪声		0.966 764		0.876 833		0.902 248
椒盐噪声		0.971 652		0.882 698		0.900 293
斑纹噪声		0.975 562		0.866 08		0.887 586
泊松噪声		0.977 517		0.882 698		0.898 338
JPEG 压缩 (30%)		0.974 585		0.880 743		0.905 181
JPEG2000 压缩 (30%)		0.972 63		0.878 788		0.902 248

降低，但仍然在 0.87 左右，因此文中算法具有较好的抗打印扫描能力。为进一步改善所提取水印效果，对其进行双边滤波处理，提取水印 NC 值提高到 0.9 左右，主观视觉效果也得到很好改善。

3.3 算法比较

为了进一步验证文中算法的强鲁棒性，从 1 次打印扫描提取水印和文献[7]进行比较,从 2 次打印扫描提取水印和文献[6]进行比较,提取的水印及 NC 值见表 4。

表 4 打印扫描鲁棒性比较
Tab.4 The comparison of print-scan robustness

算法	1 次打印扫描		算法	2 次打印扫描	
	提取水印	NC 值		提取水印	NC 值
文献 [7]		0.75	文献 [6]		<0.60
文中		0.92	文中		0.74

文献[7]选取图像作为载体，经过 1 次打印扫描提取水印的 NC 值为 0.75 且主观视觉效果较差,文中所选载体为 QR 码，打印扫描后提取水印的 NC 值达到 0.92 且提取水印图像清晰。将水印图像进行第 2 次打印扫描后，文献[6]提取水印 NC 值小于 0.60 且无法识别,而文中算法提取水印的 NC 值为 0.74 且含水印 QR 码载体信息均可正确识别，因此，文中算法的抗打印扫描能力更强，水印安全性更高。同时，

QR 码和数字水印技术相结合，具有较强的实用性，可以抵抗无意或有意的打印扫描攻击，提升了数字作品的安全性。

4 结语

提出了一种自适应的抗打印扫描盲水印算法，该算法基于 DWT 和 Schur 分解系数差值的稳定性将二值水印嵌入到 QR 码载体图像中。实验结果表明，该算法具有很强的抗打印扫描性能，且对噪声攻击和 JPEG 压缩等 also 具有很强的鲁棒性，对数字水印防伪具有很好的实际应用价值。

参考文献：

[1] XIE Rong-sheng, WU Ke-shou, XU Gao-pan, et al. Research on Anti-Counterfeiting Quick Response 2D Barcode Techniques Based on Digital Watermark[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (ScieNCe), 2013, 18(4): 443—447.

[2] 刘英, 王俊祥, 胡鸿豪, 等. 基于 Contourlet 变换和 QR 分解的鲁棒性盲数字水印算法[J]. 光电子·激光, 2016(3): 317—324.

LIU Ying, WANG Jun-xiang, HU Hong-hao, et al. Robust Blind Digital Watermarkng Scheme based on Contourlet Transform and QR Decomposition[J]. Journal of Optoelectronics.Laser, 2016(3): 317—324.

[3] 刘玄玄, 王晓红. 基于视觉显著图的数字水印算法[J]. 光学技术, 2016, 42(3): 260—263.

LIU Xuan-xuan, WANG Xiao-hong. Digital Watermarking Algorithm Based on SalieNCy Map[J]. Opti-

- cal Technique, 2016, 42(3): 260—263.
- [4] 戚娜. 数字水印的相关应用研究[J]. 电子设计工程, 2017, 25(1): 152—154.
- QI Na. Research on the Application of Digital Watermarking[J]. International Electronic Elements, 2017, 25(1): 152—154.
- [5] MIRZA M T, AHMED Q, MUNIB S, et al. A New Hybrid Domain Based Print-Scan Resilient Image Watermarking Technique[C]// International Conference on Frontiers of Information Technology(FIT), Islamabad, IEEE, 2014: 170—175.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 卢宾. 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 金美玲. 基于 DWT-SVD 域的彩色图像水印算法研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2016.
- JIN Mei-ling. Based on DWT and SVD Domain Watermarking Algorithm of Color Image[D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2016.
- [12] MAKBOL N M, KHOO B E, RASSEM T H. Block-based Discrete Wavelet Transform-singular Value Decomposition Image Watermarking Scheme Using Human Visual System Characteristics[J]. Image Processing Letters, 2016, 10(1): 34—52.
- [13] 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.
- [14] SU Qing-tang. Research on Blind Watermarking Scheme of Digital Color Image[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2013.
- [15] XIAO Z, ZHANG Y, FENG C, et al. A Robust and Encrypted Digital Image Watermarking Method against Print-Scan[C]// Chinese Automation Congress, 2015.