

一种强鲁棒性的彩色图像数字水印技术

魏代海, 王晓红, 刘玄玄
(上海理工大学, 上海 200093)

摘要: **目的** 提出了一种彩色图像数字水印技术, 解决数字水印在大数据量水印、不可见性和鲁棒性之间的关系。 **方法** 该算法对彩色QR码水印和彩色载体图像分别进行RGB三通道分解, 彩色水印单通道图像进行混沌加密; 对彩色载体单通道图像进行Contourlet变换; 按对应通道将水印嵌入到载体图像低频奇异值分解后的对角矩阵。 **结果** 该算法在水印嵌入和提取仿真实验结果为PSNR>50 dB; 鲁棒性仿真实验结果表明, 该算法在抵抗任意旋转攻击和基本图像处理操作的攻击下, 提取出来的彩色QR码颜色未失真, 并且均能够成功解码和自动识别。 **结论** 该算法具有较强的鲁棒性和较好的不可见性, 能够很好地将彩色水印嵌入彩色图像, 可应用到实际的数字版权保护中。

关键词: 彩色QR码水印; 彩色载体图像; 成功解码; 自动识别

中图分类号: TS801.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2016)09-0124-05

A Color Image Digital Watermarking with Strong Robustness

WEI Dai-hai, WANG Xiao-hong, LIU Xuan-xuan
(University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

ABSTRACT: A color image digital watermarking technique was proposed to solve the relationship among the watermark, invisibility and robustness of digital watermarking. Firstly, the RGB three-channel decomposition was performed on the color QR codes and color images. Secondly, color watermark was treated by chaotic transform and Color image by Contourlet transform. Thirdly, the watermark was embedded into the matrix of the low frequency of the carrier image after singular value decomposition. The simulation result of this algorithm was PSNR>50 dB. Experimental results showed that the proposed algorithm was capable of resisting arbitrary rotation and basic image processing operations. The color QR codes extracted could be successfully decoded. The algorithm had strong robustness and good invisibility, and could well embed color watermark into color image. Therefore, it could be used in the actual digital copyright protection.

KEY WORDS: color QR code watermarking; color image; successful decoding; automatic recognition

近些年,随着互联网技术的飞速发展,数字产品在网络中的获取、使用和传播越来越方便。数字版权保护变得非常重要,而数字水印技术为解决这一问题提供了有效的途径^[1-2]。目前,数字水印基本上是针对数字图像版权的保护而设计的,而且只能抵抗一般常见的图像攻击,对几何攻击效果不好。数字图像的版

权保护非常重要,亟需设计一种数字水印技术抵抗大多数的图像处理攻击和集合攻击。

现今,网络中使用和传播的主要是彩色图像,所以彩色图像的水印算法开始被重视。彩色图像水印算法经历了二值图像水印嵌入彩色图像^[2]、灰度图像水印嵌入彩色图像^[3-8]、彩色图像水印嵌入彩色图像^[9-14]

收稿日期: 2015-11-24

基金项目: 上海市研究生创新基金(JWCXSL 1402)

作者简介: 魏代海(1988—),男,山东日照人,上海理工大学硕士生,主攻数字水印、图像处理。

通讯作者: 王晓红(1971—),女,陕西人,博士,上海理工大学教授、硕士生导师,主要研究方向为色彩学与色彩应用、印刷质量检测与控制、数字印刷技术和数字水印技术。

3个阶段。彩色水印嵌入彩色图像开始被学者们重视和研究,但文献[13—14]中的水印算法不具有强鲁棒性。文中从分析已有的相关研究的进展和其局限性入手,以实现彩色数字水印嵌入彩色图像并且能有效地提取为目的,从不可见性和鲁棒性2个角度对彩色水印算法进行深入研究。

1 算法分析

1.1 Logistic混沌图像加密技术

混沌系统具有对初值的极度敏感性、分叉、内随机性、非线性和非周期性的特点^[15]。混沌系统的特点使其被广泛地使用在图像加密领域。混沌加密的主要过程是:首先,混沌算法迭代运算,产生混沌序列,通过混沌序列对图像数据进行加密运算。在混沌加密和解密系统中,仅仅掌握混沌序列的方程而不知道混沌系统的参数和初始值是很难破译的,并且这些关键值来源于有理数域。文中采用Logistic混沌图像加密算法:

$$X_{n+1}=\mu X_n(1-X_n)$$
(1)

式中:将 X_n 定义为映射变量,将 μ 定义为系统变量。Logistic混沌加密算法对Lena图像加密效果见图1。



图1 图像加密
Fig.1 Image encryption

1.2 Contourlet变换

Contourlet变换,也叫做塔形方向滤波器组,是在Curvelet基础上形成的一种“真正的”图像二维表示法,能够捕捉各个方向的信息^[16]。Contourlet变换分为尺度分析和方向分析两部分。采用拉普拉斯金字塔(Laplacian Pyramid, LP)变换对图像实施多尺度分解,来捕获奇异点;用方向滤波器(DFB)进行多方向分解。通过将同方向奇异“点”合成“线”,LP分解得到的带通图像传送到DFB后,就能得到不同方向的子带图像,通过迭代Contourlet变换可得到多个尺度多个方向

的子带图,见图2。

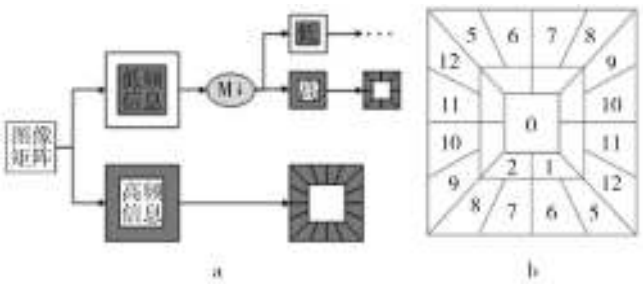


图2 Contourlet变换分解与Contourlet变换尺度和方向分布
Fig.2 Contourlet transform decomposition and Frequency sub-bands distribution of Contourlet transform

1.3 奇异值分解

从数学角度看,彩色图像的单通道灰度图可以被看作一个非负矩阵^[5-8]。彩色图像单通道灰度图可以认为是矩阵 D ,定义为 $D=A^{M \times N}$,其中 A 表示实数域,则矩阵 D 经过奇异值分解的公式可以定义为:

$$D=USV^T$$
(2)

式中: U 和 V 为正交矩阵; S 是对角矩阵,并且对角线上的元素符合规律为:

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 \geq \dots \geq \sigma_r \geq \sigma_{r+1} = \sigma_M = 0$$
(3)

式中, D 矩阵的秩为 r ,等于非零奇异值的个数。

奇异值分解具有两大优点:奇异值的稳健性较好,当图像受到小的扰动时,奇异值不会发生大的变化;奇异值所表达出来的是图像内蕴特征而不是视觉特征。奇异值应用在水印算法中有虚警率的问题,因为奇异值向量与图像之间并不存在一一对应关系,不能构造出图像的几何结构^[17]。图像奇异值分解的基空间,也就是2个正交矩阵,与图像内容相关,所以,如果提取时采用其他图像的正交矩阵来代替,就能构造出任意期望的水印图像。为了解决虚警率问题,文中将奇异值分解得到的 V 矩阵作为控制参数嵌入载体图像,用来验证所提取出的水印是否是所嵌入水印图像。

2 水印的嵌入和提取

2.1 水印的嵌入算法

- 1) RGB载体图像三通道分解,并对每个通道进行contourlet变换,取其低频分量进行SVD分解,分别得到3个奇异值矩阵 S_r, S_g, S_b 。
- 2) RGB水印图像三通道分解,并对其进行加密分

别得到 W_r, W_g 和 W_b 。

3) 对应通道嵌入水印。以 R 通道为例, 将 W_r 加权叠加到 S_r 上, 然后进行 SVD 分解, 得 $S_r + \alpha W_r = U_2 S_2 V_2^T$, SVD 还原, 得到低频系数 (一般 $\alpha = 0.1$)。

4) 改变正交矩阵 V_2 的大小, 得矩阵 V_w , 将 V_w 加权嵌入到某一高频信息中。

5) G 和 B 通道按照步骤 3) 嵌入水印。三通道分别进行 Contourlet 逆变换, 得到含水印的 R, G, B 3 分量。

6) 合成得到含水印的 RGB 载体图像。水印嵌入过程见图 3。



图3 水印嵌入流程

Fig.3 The flow chart of watermark embedding algorithm

2.2 水印的提取算法

1) 含水印的 RGB 载体图像三通道分解, 然后进行 Contourlet 分解得到三通道低频分量 R_L, G_L, B_L 。

2) 提取出 R 通道对应高频分量 V_w^* 与 V_w 进行相似度比较和判断, 如果确定相似, 继续提取水印, 如果不相似, 停止提取。

3) 对每个通道分别提取水印, 以 R 通道为例。对其低频分量 R_L 进行 SVD 分解, $R_L = U_3 S_3 V_3^T$ 。水印信息主要包含在嵌入水印后 SVD 分解的 U_2, V_2 矩阵, 所以提取水印 $V_r^* = (U_2 S_2 V_2^T - S_r) / \alpha$ 。

4) 按照步骤 3), 提取出含水印图像 G 通道和 B 通道的水印 W_g^* 和 W_b^* 。

5) 加密水印信息解密, 分别得到 RGB 三通道的水印信息。

6) 三通道水印合成, 得到 RGB 水印图像。水印提取流程见图 4。

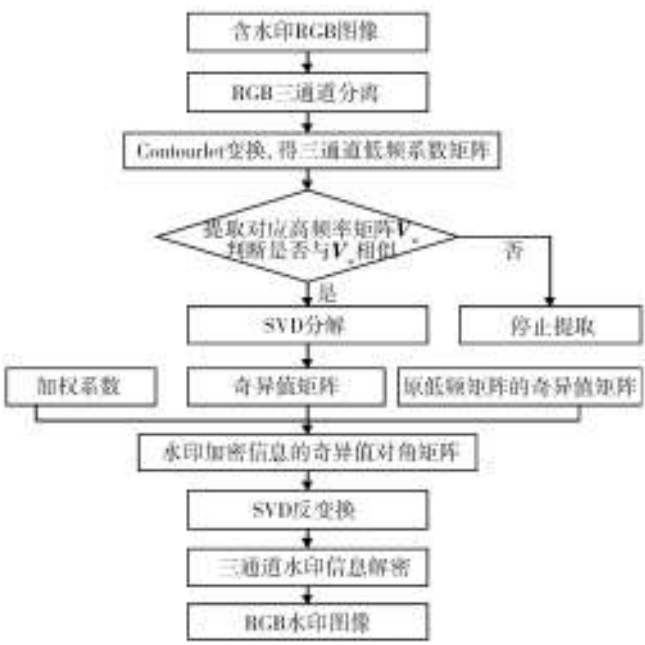


图4 水印提取流程

Fig.4 The flow chart of watermark extracting algorithm

3 实验结果及分析

3.1 水印算法仿真实验

文中的仿真实验载体图像是大小 256×256 像素的 RGB 图像 (Peppers 图), 水印图像为 64×64 像素大小的 RGB 图像。用峰值信噪比 (PSNR) 来评价嵌入水印后载体图像的不可见性, RGB 图像的 PSNR 公式如下:

$$PSNR = 10 \lg \frac{255^2}{\frac{1}{3} [MES(R) + MES(G) + MES(B)]}$$
 (4)

式中: MES (均方差) 公式如下:

$$MES = \frac{1}{N \times N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N [x'(i, j) - x(i, j)]^2$$
 (5)

式中: $x(i, j)$ 代表原始载体图像的 R, G, B 分量的像素值; $x'(i, j)$ 代表嵌入水印后的载体图像的 R, G, B 分量的像素值。

文中硬件采用 iPhone 6 手机中微信应用的 QR 码扫码器, 对提取出的彩色 QR 码行识别, 保持解码率的真实性和客观性。

由图 5 可知, 采用 2 幅不同信息、不同的彩色 QR 码水印分别嵌入载体图像, PSNR 值都大于 50 dB, 满足水印嵌入要求。



图5 水印嵌入和提取仿真结果
Fig.5 Simulation results of watermark embedding and extracting



图6 水印鲁棒性仿真实验结果
Fig.6 The simulation results of watermark robustness

的彩色QR码能成功解码。目前,大多数水印算对旋转攻击的抵抗力较差,从上面结果可知该算法能够抵抗任何角度的旋转攻击。另外,该算法对裁切攻击和压缩攻击具有较强的鲁棒性。以上结论说明了该水印算法的可行性。

4 结语

文中提出了Contourlet-SVD水印算法。该算法通

3.2 水印算法的鲁棒性实验

选取 256×256 的Peppers彩色图像作为载体图像,选取 64×64 的彩色QR码作为水印图像,嵌入强度 $\alpha=0.1$,分别对含水印的载体图像进行椒盐噪声、高斯噪声、旋转、裁切和JPEG压缩攻击,然后计算原始RGB载体图像和含水印的RGB载体图像的PSNR值,读取所提出的彩色QR码,判断提取的水印是否可以解码,用是否成功解码率从客观上评价文中的数字水印算法的鲁棒性,见图6。

由图5可知,嵌入水印后的载体图像与原始图像相似度非常高,具有较好的不可见性。从图6的鲁棒性实验可以得出结论,该算法不仅对椒盐、高斯等普通图像攻击方法具有较强的鲁棒性,而且对提取出来

过contourlet频域变换和奇异值分解将彩色QR码水印嵌入到彩色图像当中,并且具有较高的不可见性和较好的鲁棒性。文中使用彩色QR作为水印,是利用彩色QR码自身具有的纠错性能和校正功能进一步提高水印的鲁棒性。在提取水印的评价方面,使用客观识别工具对提取出的彩色QR码进行自动识别,客观评价。

通过最终的实验数据表明,该算法能抵抗常规攻击和几何攻击,能提取出彩色QR码水印,使用客观扫码工具均能够成功解码。结果显示Contourlet-SVD水

印算法具有较高的鲁棒性和安全性,因此,此水印技术有一定的应用价值。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 王子煜,孙刘杰. 改进的基于QR码的数字全息水印[J]. 包装工程,2014,35(7):144—148.
WANG Zi-yu, SUN Liu-jie. Improved QR Code-based Digital Holographic Watermark[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(7): 144—148.
- [3] LI Y, HAO Y, WANG C. A Research on The Robust Digital Watermark of Color Radar Images[C]// Information and Automation (ICIA), 2010 IEEE International Conference on, 2010:1091—1096.
- [4] SENGAR A, VERMA P. Digital Watermark Performance with Visual Secret Sharing on Either of RGB Plane of Colour Image [C]// Wireless and Optical Communications Networks (WOCN), 2012 Ninth International Conference on IEEE, 2012:1—5.
- [5] ROY A, MAITI A K, GHOSH K. A Perception Based Color Image Adaptive Watermarking Scheme in YCbCr Space[C]// Signal Processing and Integrated Networks (SPIN), 2015 2nd International Conference on IEEE, 2015:537—543.
- [6] AGARWAL R, SANTHANAM M S, VENUGOPALAN K. Multichannel Digital Watermarking of Color Images Using SVD[C]// Image Information Processing (ICIIP), 2011 International Conference on IEEE, 2011:1—6.
- [7] ANSARI I A, PANT M, NERI F. Analysis of Gray Scale Watermark in RGB Host Using SVD and PSO[C]// Computational Intelligence for Multimedia, Signal and Vision Processing (CIMSIVP), 2014 IEEE Symposium on IEEE, 2014:1—7.
- [8] MONIRUZZAMAN M, KAYUM HAWLADER M A, FOISAL HOSSAIN M. Robust RGB Color Image Watermarking Scheme Based on DWT-SVD and Chaotic System[C]// Software, Knowledge, Information Management and Applications (SKIMA), 2014 8th International Conference on IEEE, 2014:1—6.
- [9] IMRAN M, GHAFOR A. A PCA-DWT-SVD Based Color Image Watermarking[C]// Systems, Man, and Cybernetics (SMC), 2012 IEEE International Conference on IEEE, 2012:1147—1152.
- [10] WEI Z, WANG W. Color Watermarking Algorithm Based on Modified QFFT and DCT[C]// 2010 International Conference on Optoelectronics and Image Processing IEEE Computer Society, 2010:328—331.
- [11] GEORGE J, VARMA S, CHATTERJEE M. Color Image Watermarking Using DWT-SVD and Arnold Transform[C]// India Conference (INDICON), 2014 Annual IEEE, 2014.
- [12] PRADHAN C, SAHA B J, KABI K K, et al. Blind Watermarking Techniques Using DCT and Arnold 2D Cat Map for Color Images[C]// Communications and Signal Processing (ICCSP), 2014 International Conference on IEEE, 2014:26—30.
- [13] CHAVAN S, SHAH R, POOJARY R, et al. A Novel Robust Colour Watermarking Scheme for Colour Watermark Images in Frequency Domain[C]// Proceedings of the 2010 International Conference on Advances in Recent Technologies in Communication and Computing IEEE Computer Society, 2010:96—100.
- [14] AL-GINDY A, YOUNES H, SHAHEEN A, et al. A Graphical User Interface Watermarking Technique for the Copyright Protection of Colour Images Using Colour Watermarks[C]// 2012 IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology (ISSPIT)IEEE, 2011:354—358.
- [15] 李玲,王伟男,李津杰,等. 基于Logistic映射和超混沌的自适应图像加密算法[J]. 微电子学与计算机, 2012(1):15—17.
LI Ling, WANG Wei-nan, LI Jin-jie, et al. Self-Adaptive Image Encryption Algorithm Based on Logistic Map and Hyper-chaos[J]. Micro Electronics and Computer, 2012(1): 15—17.
- [16] 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, 21(4):76—79.
BAI Tao-tao, LIU Zhen, LU Peng. Digital Watermarking Scheme in Contourlet Domain Based on QR Code[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2014, 21(4): 76—79.
- [17] 肖亮,叶建兵,韦志辉. 一类基于SVD的数字水印虚警分析与改进算法[J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 2010(2):227—231.
XIAO Liang, YE Jian-bing, WEI Zhi-hui. Analysis of High False Alarm in SVD Based Watermarking and Improved Algorithm[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2010(2): 227—231.