

基于QR码与混沌加密的Contourlet域彩色图像盲水印算法

季诺然¹, 吕晓琪^{1,2}, 谷宇^{1,2}, 赵瑛¹, 刘坤¹

(1.内蒙古科技大学, 包头 014010; 2.上海大学, 上海 200444)

摘要: **目的** 针对现行数字水印算法中抗几何攻击能力弱以及嵌入水印信息容量差的问题, 提出一种Contourlet变换下QR码与混沌加密相结合的彩色图像水印算法。**方法** 采用QR码作为水印图像, 利用Logistic混沌序列对其进行加密, 再将加密的水印图像嵌入到二级Contourlet变换的低通子带中, 利用系数间的大小关系, 修改系数完成水印嵌入与提取。**结果** 通过实验结果可知, 水印的嵌入对载体图像影响较小, PSNR值高达42.764, 经过旋转、剪切及常规攻击后, 提取出的水印均可正确解码。**结论** 该算法具有良好的安全性、不可见性, 对于各类攻击具有较优的鲁棒性。水印信息容量高于普通图像, 水印提取方式为盲提取, 能够更好地满足各类数字作品版权保护的实际需要。

关键词: 数字水印; 混沌加密; QR码; Contourlet变换; 彩色图像

中图分类号: TS801.3; TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)15-0173-06

Blind Watermarking Algorithm for Color Image in Contourlet Domain Based on QR Code and Chaotic Encryption

Ji Nuo-ran¹, LYU Xiao-qi^{1,2}, GU Yu^{1,2}, ZHAO Ying¹, LIU Kun¹

(1.Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China;

2.Shanghai University, Shanghai 200444, China)

ABSTRACT: To put forward a method of color image watermarking algorithm based on the combination of QR code and chaotic encryption that under Contourlet transform to solve problems of weak geometric attack ability and poor capacity of embedded watermark information in current digital watermarking algorithm. QR code image was used as the watermark. The logistic chaotic sequence was adopted to encrypt the watermark image. Then the watermark image encrypted was embedded into the low pass subband of the secondary Contourlet transform. The relationship between coefficient sizes was used to modify the coefficient and to complete watermark embedding and extraction. Watermark embedding had few influences on the carrier image and the PSNR value could reach 42.764. After rotation, shear and conventional attack, all the watermark extracted can be decoded correctly. The algorithm not only has good security and invisibility but also has good robustness to all kinds of attacks. The information capacity of watermark is higher than that of the ordinary images. The watermark extraction method is blind extraction, which can better meet the practical needs in copy-right protection of various digital works.

KEY WORDS: digital watermarking; chaotic encryption; QR code; Contourlet transform; color image

近年来,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快捷。随之而来的版权保护问题引起了人们的高度重视。数字水印技术由此发展起来,它的核心是在不影响数据可用

性的前提下,把不可移除的水印信息嵌入在待保护的原始图像中。确保水印信息可以正确无误地提取或检测出来,以解决所有权纠纷、盗版跟踪等实际问题^[1]。目前,网络中使用和传播的主要是彩色图像,彩色图

收稿日期: 2016-12-26

基金项目: 国家自然科学基金(81460279, 61179019); 内蒙古自治区自然科学基金(2015MS0604, 2014MS0828); 内蒙古自治区高等学校科学研究项目(NJZY145, NJZZ14161); 包头市科技局项目(2015C2006-14)

作者简介: 季诺然(1993—),女,内蒙古科技大学硕士生,主攻图像处理。

通讯作者: 吕晓琪(1963—),男,博士,上海大学教授、博导,主要研究方向为图像处理。

像水印算法受到了更广泛的关注。王子煜等^[2]将经过加密傅里叶全息技术处理的 QR 码作为水印,嵌入到通过二级小波变换后的载体图像 y 分量的低频系数中,效果较好,但水印的鲁棒性有待提高。王晓红^[3]等提出一种通过 Arnold 置乱对水印信息加密与 Contourlet-DCT-SVD 水印技术完成对水印的嵌入和提取,提高了图像抵抗攻击能力,但其抵抗几何攻击能力有限。文献[4]将 Contourlet 分解与图像边缘检测结合,在复杂区域嵌入水印比特数目高的部分,在平滑区域嵌入水印比特数目低的部分,提高了水印图像鲁棒性的同时也增大了算法的复杂度,实用性有所降低。文中算法从水印图像抵抗攻击类型的局限性入手,将 QR 码作为水印嵌入经 Contourlet 变换的彩色图像,在保证鲁棒性及不可见性的前提下,以有效地提取水印信息,确保实用性为目的,对彩色图像水印技术进行深入研究。

1 QR 码

QR 码是一种矩阵式二维码,它与条形码相比可以更快地被识别,信息容量比条形码大,可以携带更多的水印信息,也被称为快速响应矩阵码^[5-6]。QR 码结构见图 1,包括编码区、功能图形和空白区等部分。

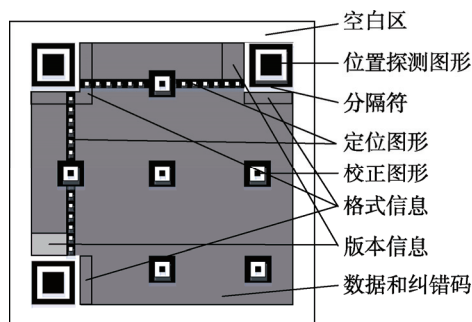


图 1 QR 码结构原理
Fig.1 QR code structure

QR 码具有较强的定位性能和校正性能,其利用 RS 纠错算法,具有 7%、15%、25%、30% 等 4 个纠错等级。只要在纠错能力范围内,即使编码变脏或破损,也可正确解码^[7]。条形码在传输过程中如果被损坏,接受的码字信息会发生较大的改变,实际应用价值小。利用 QR 码较强的纠错能力,携带的信息可以近乎完整的保留,确保图像在遭到破坏后仍可读取其所包含的信息,从而更好地保证水印图像的鲁棒性。

2 Contourlet 变换

2002 年 Do 和 Vetterli 在 Curvelet 思想的基础上提出了一种新的非自适应的多方向多尺度变换——Contourlet 变换^[8]。Contourlet 变换能够以近

似最优的效率表示方法来描述图像任何一维的平滑边缘,它使用比小波变换更少的系数来描述光滑曲线,从而更好地逼近图像的几何结构。

Contourlet 变换通过拉普拉斯金字塔变换和方向性滤波器组来实现,是一种双重迭代滤波器组成结构^[9-10]。Contourlet 分解示意图 2。首先通过拉普拉斯金字塔(LP)将图像分解为低频子带和高频子带,然后利用方向滤波器组(DFB)处理高频细节部分,依据方向信息将捕获的奇异点汇集,形成轮廓段,达到获取方向信息的目的。经过方向性滤波器组后,高频子带可分解为 2^n 个方向子带。对低频子带重复上述过程即可实现图像的多分辨率多方向分解。

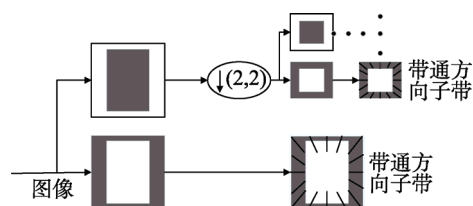


图 2 Contourlet 变换流程
Fig.2 Flow chart of Contourlet transform

3 算法实现

3.1 色彩空间转换

为了在图像处理及显示过程中得到更好的效果,需要建立相关的颜色模型。颜色模型表示的是三维颜色空间内的一个可见光子集,包含了某颜色域内的所有颜色。常见的模型有 RGB 模型、YUV 模型、HSI 模型等。RGB 模型主要用于计算机显示,与人眼的视觉系统特性并不相适应,其各分量间的冗余信息比较多,计算量、嵌入水印对视觉的冲击大^[11]。YUV 模型利用人眼视觉系统对亮度变化比对色调与饱和度变化更加敏感的特性进行设计,它能够分离亮度信号 (Y 分量) 和色度信号 (U, V 分量),消除亮度与色度信号间的紧密联系,从而可以单独处理亮度分量而不影响图像颜色,降低计算的复杂度,较其他模型来说,更适用于数字水印算法,能够更好地提升水印的鲁棒性。RGB 色彩模型与 YUV 色彩模型的转换公式见式(1)。

$$\begin{bmatrix} Y \\ U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ -0.147 & -0.298 & 0.436 \\ 0.615 & -0.515 & -0.100 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (1)$$

3.2 Logistic 混沌序列加密技术

混沌系统具有随机性、非收敛性、不可预测性、对初始条件值非常敏感、容易产生等特性,适合应用在信息加密和保密通信方面^[12-14]。混沌系统分为 Logistic、Lorenz、Chenbyshev 以及广义 Henon 混沌系统,其中 Logistic 混沌序列更适用于 QR 码二值图

像的特点, 因此选用这一方式对图像进行加密和解密。将混沌序列的参数 μ 和初始值 x_0 作为加密密钥和解密密钥。一维 Logistic 离散序列的表达式为:

$$X_{n+1} = \mu X_n (1 - X_n), n \in N, X_n \in (0, 1) \quad (2)$$

当 $3.569945 < \mu < 4$, Logistic 序列为混沌状态。根据选好的参数 μ 和初始值 x_0 , 利用式(2)产生混沌序列, 再经式(3)将其转化为一个对应的二值混沌序列。

$$y_n = \begin{cases} 0, & 0 < x_n \leq 0.5 \\ 1, & 0.5 < x_n \leq 1 \end{cases} \quad (3)$$

由此, 利用二值混沌序列 $\{y_0, y_1, y_2 \dots y_n \dots\}$ 与 QR 码图像的像素值异或计算, 从而实现对水印图像的加密与解密。Logistic 混沌加密算法对 QR 码图像加密的效果见图 3, 实验参数 $\mu=3.898\ 372\ 242\ 5$, 初始值 $x_0=0.758\ 529\ 215\ 3$ 。QR 码加密示意图 3。



图 3 QR 码加密

Fig.3 QR code encryption

3.3 水印的嵌入

结合 Logistic 混沌序列加密、Contourlet 变换以及 QR 码的特性, 提出一种新颖的彩色图像数字水印算法, 流程见图 4。

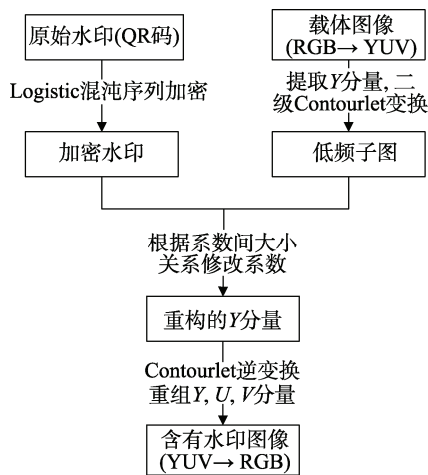


图 4 水印嵌入流程

Fig.4 Watermark embedding flow chart

1) 将 RGB 模型下的载体图像 I 转为 YUV 模型, 将水印信息嵌入到 Y 分量中。

2) 对 Y 分量进行二级 Contourlet 分解, 得到二级低频子图像, 从中选取 $n \times n$ 个系数嵌入水印。

3) 将水印信息编码, 得到标准 QR 码图像, 利用 Logistic 混沌序列与其进行异或计算得到加密置乱的水印图像 W , 将设置的参数 μ 和初始值 x_0 保留作为密钥。

4) 利用差值比较, 修改图像系数的方法进行水印图像嵌入。将选取的系数作为中心, 计算得到其八邻域系数中值 $v(i, j)_c$, 再与选取的数值对比。如果该系数大于 $v(i, j)_c$, 则辅助矩阵对应的位置设“1”, 否则设“0”。生成辅助矩阵 R 见式(4)。

$$R(x, y)_c = \begin{cases} 1 & d(i, j)_c > v(i, j)_c \\ 0 & d(i, j)_c \leq v(i, j)_c \end{cases} \quad (4)$$

5) 根据式(5)对每个嵌入位置的系数 $d(i, j)_c$ 作相应修改。

$$d^w(i, j)_c = \begin{cases} v(i, j)_c - \alpha |d(i, j)_c| & W^w(x, y) = 0 \text{ 且 } R(x, y)_c = 1 \\ v(i, j)_c + \alpha |d(i, j)_c| & W^w(x, y) = 1 \text{ 且 } R(x, y)_c = 0 \\ d(i, j)_c & W^w(x, y) = R(x, y)_c \end{cases} \quad (5)$$

式中: $d(x, y)_c$ 和 $d^w(x, y)_c$ 分别为嵌入水印前后的系数, α 为嵌入强度系数, $\alpha \in (0.55, 0.75)$ (α 的取值范围通过大量实验统计得出, 具体数值根据载体图像与水印图像的复杂程度视情况而定)。

6) 对载体图像进行 Contourlet 逆变换, 得到包含水印信息的灰度图像, 再将新的灰度分量与色度分量合成得到 YUV 模型下的彩色图像, 转换到 RGB 模型, 得到嵌入水印的彩色图像。

3.4 水印的提取

水印提取过程是嵌入过程的逆过程, 不需要借助原始图像为盲提取^[15]。水印提取流程见图 5。

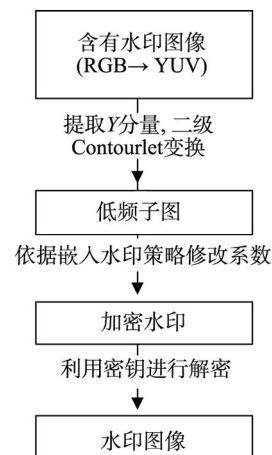


图 5 水印提取流程

Fig.5 Watermark extraction flow chart

1) 将待检测图像由 RGB 色彩模型转化至 YUV 色彩模型, 提取 Y 分量进行二级 Contourlet 分解, 得到二级低频子图像, 分解尺度和方向与嵌入过程保持一致。

2) 依据嵌入水印时选取系数的策略, 确定嵌入水印的 $n \times n$ 个位置。利用式(6)修改系数, 得到水印图像加密后的矩阵 R' 。

$$R'(x, y)_c = \begin{cases} 1 & d^w(i, j)_c > v(i, j)_c \\ 0 & d^w(i, j)_c \leq v(i, j)_c \end{cases} \quad (6)$$

3) 利用水印嵌入时设置的参数 μ 和初始值 x_0 产生一个与加密时完全一样的二值混沌序列, 将其与加密的水印图像像素值进行异或计算从而实现解密。

4) 将解密得到的数据写成图像格式, 对其进行译码获得原始信息。

4 实验结果及分析

4.1 评价指标

数字水印算法的评价指标的种类很多, 除主观评价外, 利用峰值信噪比(PSNR)作为客观评价指标来评价算法的不可见性^[16-17]。对于 $M \times N$ 大小的载体图像, 嵌入水印后的图像与原始图像的 PSNR 值为:

$$\text{PSNR} = 10 \lg \frac{255^2 MN}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (l(i, j) - l_w(i, j))^2} \quad (7)$$

式中: $l_w(i, j)$ 为嵌入水印图像的 R, G, B 分量的像素值; $l(i, j)$ 为原始水印图像的 R, G, B 分量的像素值。PSNR 值的单位为 dB, PSNR 的值越大, 图像失真度越小。

由于文中所用 QR 码为客观图像信息, 因此在评价标准中采用智能设备对 QR 码进行扫码操作, 将能否准确译码获得完整水印信息作为评价标准。

4.2 实验仿真

实验采用 RGB 模型下 A, B, C 等 3 幅复杂程度不同的彩色图像作为载体图像, 大小为 512×512 。水印

图像 a 是由字符串“jiniuoran”进行编码得到的标准 QR 码, 水印图像 b 则由字符串“NMKGJDX014010”进行编码得到, 纠错等级选为 30%, 大小调整为 64×64 。Contourlet 变换的 LP 采用“9-7”金字塔滤波器, DFB 采用“pkva”方向性滤波器^[18]。根据提出的水印嵌入和提取算法进行实验, 得到嵌入水印的彩色图像和提取的水印图像。实验结果见图 6。

由于 Y 分量对亮度的敏感性, 将水印图像嵌入其中会造成载体图像亮度和对比度发生变化, 所提算法有效地解决了这一问题。对于 3 幅完全不同的图像, PSNR 值高达 42.7, 43.8, 43.5, 单凭人眼不能识别嵌入水印前后图像的变化, 可见水印图像具有良好的不可见性, 所提取水印图像也能够成功解码。

为了更好的验证算法的有效性和实用性, 对含水印图像 A', B', C' 进行鲁棒性检测, 计算载体图像的 PSNR 值并用电子设备进行扫码检测, 并与文献[3]的实验结果做对比。在 3 组实验中, 选取载体图像 A 嵌入水印图像 a 的实验效果进行展示, 见图 7。其他实验数据汇总见表 1。

由表 1 可知, 所提出算法在 3 幅完全不同的载体图像分别嵌入不同复杂度的水印图像时, 即使遭受了各种攻击, 仍然保持较高的鲁棒性和不可见性。在高斯噪声、JPEG 压缩以及椒盐噪声的攻击下, PSNR 值普遍高于文献[3], 提取的水印图像均能准确译码, 正确率高达 98%, 有效地保证了水印技术的不可见性。通常嵌入水印的图像抵抗几何攻击能力较弱, 但文中算法在几何攻击中充分提高优化了图像的鲁棒性, 且较文献[3]能够更有效地抵抗剪切攻击, 正确译码率达到 96% 以上, 进一步提升了水印技术的安全性。



图 6 实验效果

Fig. 6 Experimental results chart

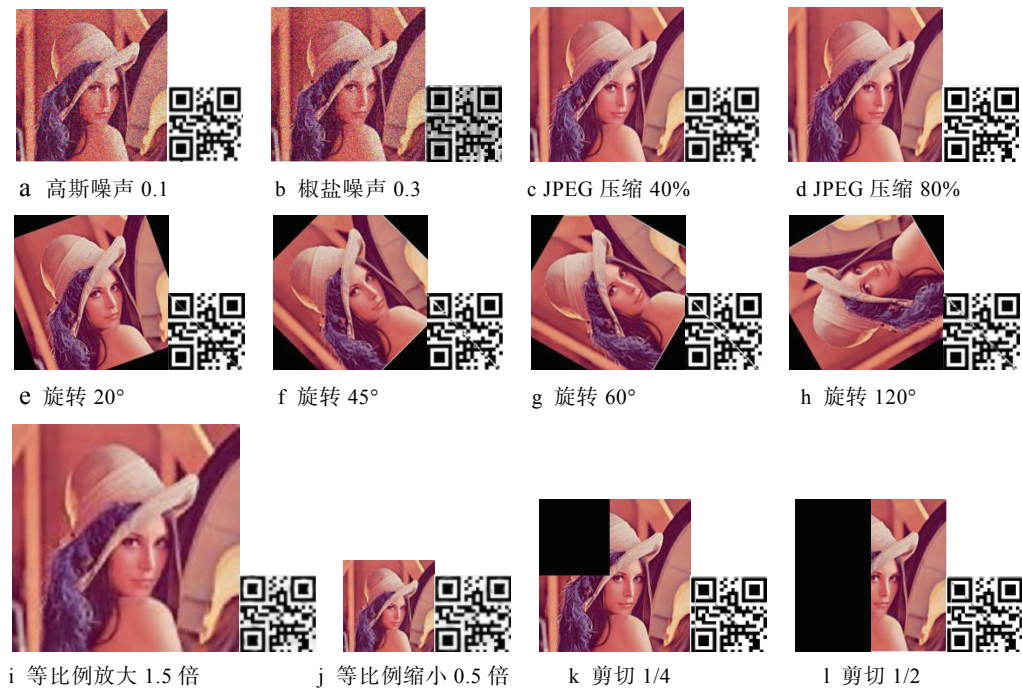


图 7 水印鲁棒性检测实验效果
Fig.7 Watermark robustness test results

表 1 水印攻击实验结果
Tab.1 Experimental results of watermark attack

攻击方式	图像 A		图像 B		图像 C		文献[3]图像
	PSNR/dB	正确译码率/%	PSNR/dB	正确译码率/%	PSNR/dB	正确译码率/%	PSNR/dB
高斯噪声(0.1)	30.7	99	29.6	98	30.2	99	27.5
椒盐噪声(0.3)	29.8	98	28.1	97	31.4	98	26.6
JPEG 压缩 60%	45.2	99	45.3	99	46.7	99	42.5
JPEG 压缩 90%	47.3	99	44.7	99	45.9	98	47.2
旋转 20°	30.7	98	31.5	97	32.4	97	—
旋转 45°	29.2	97	30.8	98	28.1	98	28.1
旋转 60°	28.6	97	29.6	97	28.3	98	27.9
旋转 120°	28.4	97	27.4	97	29.2	97	28.3
等比例放大 1.5 倍	39.5	99	40.1	99	38.7	98	—
等比例缩小 0.5 倍	36.3	98	39.6	98	37.9	98	—
剪切 1/4	26.7	96	26.8	96	27.4	96	25.4
剪切 1/2	20.6	95	22.9	95	23.1	95	—

注：文献[3]中只表明算法遭受攻击后提出的水印图像能够译码，并未说明译码率

5 结语

提出了一种基于 QR 码与 Logistic 混沌加密的 Contourlet 域彩色图像盲水印算法，将经过混沌序列加密的 QR 码作为水印图像，结合 Contourlet 变换提出的水印算法，能够有效地提高图像在实际应用中抵抗旋转、剪切攻击的能力。Contourlet 变换的各向异性使载体图像得到了更好的分解，从而保证水印图像的不可见性。利用 QR 码的高数据容量，有效地提升了水印信息的嵌入量，其自身的纠错校正性能明显提

高了图像的鲁棒性。实验结果说明，该算法不仅在抵抗常见攻击时表现优秀，还优化了水印图像抵抗几何攻击的性能，达到保证水印技术实用性和安全性的目的。文中算法针对彩色图像，提取方式为盲提取。所提出的数字水印技术在实际应用中具有广阔的发展前景和推广价值。

参考文献：

[1] RABIZADEH M, AMIRMAZLAGHANI M, AHMA DIAN-ATTARI M. A New Detector for Contourlet

- Domain Multiplicative Image Watermarking Using Bessel K form Distribution[J]. Journal of Visual Communication & Image Representation, 2016, 40: 324—334.
- [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] 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(10): 1094—1100.
WANG Xiao-hong, WEI Dai-hai, LIU Xuan-xuan, et al. Digital Watermarking Technique of Color Image Based on Color QR Code[J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2016(10): 1094—1100.
- [4] FAZLALI H R, SAMAVI S, KARIMI N, et al. Adaptive Blind Image Watermarking Using Edge Pixel Concentration[J]. Multimedia Tools & Applications, 2016: 1—16.
- [5] 韩宁, 闫德勤, 韩丽丽. 可视密码学的 Contourlet 域图像水印[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(1): 170—172.
HAN Ning, YAN De-qin, HAN Li-li. Contourlet-domain Image Watermarking Based on Visual Cryptography[J]. Computer Engineering and Applications, 2011, 47(1): 170—172.
- [6] VONGPRADHIP S, RUNGRAUNSLIP S. QR Code Using Invisible Watermarking in Frequency Domain[C]// 2011 Ninth International Conference on ICT and Knowledge Engineering, 2012: 47—52.
- [7] 冯汉禄, 黄颖为, 牛晓娇, 等. QR 码纠错码原理及实现[J]. 计算机应用, 2011, 31(1): 40—42.
FENG Han-lu, HUANG Ying-wei, NIU Xiao-jiao, et al. Principle and Implementation of Error Correcting Coding of QR Code[J]. Journal of Computer Applications, 2011, 31(1): 40—42.
- [8] DO M N, VETTERLI M. Contourlets[M]. New York: Academic Press, 2002.
- [9] CHALAMALA S R, KAKKIRALA K R, MALLIKARJUNA R G B. Analysis of Wavelet and Contourlet Transform Based Image Watermarking Techniques[C]// Advance Computing Conference 2014: 1122—1126.
- [10] NEMATOLLAHI M A, AL-HADDAD S A R, ZARAF SHAN F. Blind Digital Speech Watermarking Based on Eigen-value Quantization in DWT[J]. Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences, 2015, 27(1): 58—67.
- [11] 王丽丽. 基于 Contourlet 变换的图像数字水印研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011.
WANG Li-li. Research on Image Watermarking Based on Contourlet Transform[D]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology, 2011.
- [12] 李晨璐, 孙刘杰, 李孟涛. 强鲁棒性全息水印算法[J]. 包装工程, 2012, 33(13): 104—107.
LI Chen-lu, SUN Liu-jie, LI Meng-tao. Robust Holographic Watermarking Algorithm[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(13): 104—107.
- [13] 张永红, 张博. 基于 Logistic 混沌系统的图像加密算法研究[J]. 计算机应用研究, 2015, 32(6): 1770—1773.
ZHANG Yong-hong, ZHANG Bo. Algorithm of Image Encrypting Based on Logistic Chaotic System[J]. Application Research of Computers, 2015, 32(6): 1770—1773.
- [14] 张定会, 潘永华, 张兴华, 等. 彩色数字图像的混沌加密和解密方法研究[J]. 通信技术, 2009, 42(1): 245—247.
ZHANG Ding-hui, PAN Yong-hua, ZHANG Xing-hua, et al. Researches on Chaotic Encryption and Decryption of Color Digital Image[J]. Journal of China Communications, 2009, 42(1): 245—247.
- [15] PRADHAN C, SAHA B J, KABI K K, et al. Blind Watermarking Techniques using DCT and Arnold 2D Cat Map for Color Images[C]// International Conference on Communications and Signal Processing IEEE, 2014: 26—30.
- [16] 张晓强, 王蒙蒙, 朱贵良. 图像水印算法研究新进展[J]. 计算机工程与科学, 2012, 34(4): 17—22.
ZHANG Xiao-qiang, WANG Meng-meng, ZHU Gui-liang. A Novel Survey on the Image Watermarking Algorithms[J]. Computer Engineering & Science, 2012, 34(4): 17—22.
- [17] SHARMA P, CHAWLA P. Robust Digital Watermarking Using Contourlet Transform for Coloured Images[C]// International Conference on Image Information Processing IEEE, 2015: 119—123.
- [18] 李洪均, 赵志敏, 陈远, 等. Contourlet 变换中不同滤波器对图像去噪效果的研究[J]. 红外技术, 2008, 38(8): 450—453.
LI Hong-jun, ZHAO Zhi-min, CHEN Yuan, et al. Research on Image Denoising via Different Filters in Contourlet Domain[J]. Infrared Technology, 2008, 30(8): 450—453.