

文章编号: 1004-4353(2017)01-0043-08

# 基于图像归一化和 NSST 的鲁棒零水印算法

孙俞超, 李德\*

( 延边大学工学院 计算机技术学科 网络通信与信息安全研究室, 吉林 延吉 133002 )

**摘要:** 为了更有效地提取数字漫画的边缘轮廓特征, 提出一种基于图像归一化和非下采样剪切波变换 (NSST, non-subsampled shearlet transform) 的零水印算法. 首先, 将数字漫画图像进行归一化处理. 然后, 采用 NSST 和离散余弦变换 (DCT) 提取图像的低频分量, 再采用非负矩阵分解 (NMF, non-negative matrix factorization) 提取特征向量作为图像的特征信息; 处理水印图像时, 采用基于完全互补码的扩频技术和混沌置乱技术以提高算法的鲁棒性和安全性. 最后, 对数字漫画图像的特征信息与水印图像进行异或逻辑运算得到零水印. 实验结果表明, 本文算法在抵抗高斯噪声、椒盐噪声、几何变换、JPEG 压缩、邻域滤波等攻击时都具有很强的鲁棒性, 同时能够抵抗一定程度的剪切攻击.

**关键词:** 零水印; 图像归一化; 非下采样剪切波变换 (NSST); 完全互补码

中图分类号: TP391.41

文献标识码: A

## Robust zero-watermark algorithm based on image normalization and non-subsampled shearlet transform

SUN Yuchao, LI De\*

( *Network Communication and Information Security Lab., Dept. of Computer Technology, College of Engineering, Yanbian University, Yanji 133002, China* )

**Abstract:** A zero-watermark algorithm based on image normalization and non-subsampled shearlet transform (NSST) is purposed to extract the edge contour feature of digital cartoon more effectively. In this method, the image is processed with the method of image normalization firstly. Then, the low-frequency component is extracted with NSST and DCT. Next, the feature vector is extracted with NMF and put it as the feature information. For the watermark image, the spread spectrum technology based on complete complementary codes and chaotic scrambling technology are used to improve the robustness and security of the algorithm. Finally, the zero-watermark is derived by making the feature information of the cartoon image and the watermark image do XOR operation. The experimental results show that the method is very robust against Gaussian noise, salt & pepper noise, geometric transformation, JPEG compression and neighborhood filtering attacks, and can resist on cropping attacks to some extent.

**Keywords:** zero-watermark; image normalization; non-subsampled shearlet transform (NSST); complete complementary code

## 0 引言

随着网络技术的快速发展, 图像的版权保护越来越受到人们的重视. 在数字图像版权保护的相关技

收稿日期: 2016-11-07

\* 通信作者: 李德(1972—), 男, 博士, 教授, 研究方向为信息安全、版权保护.

基金项目: 吉林省教育厅“十三五”科学技术研究项目(吉教科合字[2016]第 249 号); 国家自然科学基金资助项目(61262090)

术中,数字水印技术是一种有效的方法之一.近年来,数字水印技术在数字图像版权保护方面取得了较多研究成果,例如:M. Amit 等<sup>[1]</sup>提出了基于 DWT-DCT 域的图像零水印算法,通过传统的小波变换方式对图像进行了特征提取,但该方法对于抵抗几何变换、噪声、剪切等攻击的鲁棒性不够强;白韬韬等<sup>[2]</sup>利用 QR 码的定位、校正和纠错性能,将 QR 码作为水印图像,并对载体图像采用 Contourlet 变换提取了低频部分,该算法能够有效地抵抗 JPEG 压缩攻击和几何攻击,但抵抗剪切攻击的鲁棒性较弱;石海风<sup>[3]</sup>通过对载体图像进行二级 Contourlet 变换和 DCT 变换提取图像特征信息构造了零水印,该算法对剪切攻击具有较强的鲁棒性,但抵抗噪声、几何变换、压缩、邻域滤波攻击的鲁棒性较弱;M. Malihe 等<sup>[4]</sup>对载体图像采用 Shearlet 变换和奇异值分解的数字水印算法,将水印图像的高位平面信息隐藏到载体图像低频系数的奇异值矩阵中,该算法抵抗噪声、几何变换、剪切等攻击的鲁棒性较强,但存在鲁棒性与不可感知性的矛盾.韩绍程等<sup>[5]</sup>提出了一种基于非下采样剪切波变换(NSST)和 QR 分解的零水印算法,该算法对抵抗 JPEG 压缩、缩放、噪声、滤波、剪切攻击具有较强的鲁棒性,但对抵抗旋转、平移攻击的鲁棒性较弱. Xiang-yang 等<sup>[6]</sup>提出了一种 NSST 的图像盲水印算法,该算法将水印信息嵌入到具有最高能量的 NSST 方向子带,根据水印数据修改 NSST 系数幅值,具有较好的不可见性和鲁棒性.基于上述研究结果,本文针对数字漫画图像的版权保护,采用图像归一化技术、NSST 与多种技术相结合的方式,设计一种能够对多种攻击具有强鲁棒性的零水印算法.

1 相关算法介绍

1.1 基于矩的图像归一化技术

图像归一化<sup>[7]</sup>的主要思想是根据图像的矩来寻找一些合适的变换参数,将原始图像变换到唯一的标准形式,而且即使原始图像经过某种不可预测的几何仿射变换后,仍然能够利用这些矩来确定变换参数,把经过仿射变换的图像归一化到标准形式.

在图像处理中,每一个数字图像都具有独一无二的矩,且具有不变性.由文献[7]可知,图像 $f(x,y)$ 的 $(p+q)$ 阶矩的数学表达式为 $m_{pc} = \sum_x \sum_y x^p y^q f(x,y)$ ,  $p,q=0,1,2,\cdots$ ,其对应的中心矩的数学表达式为 $\mu_{pc} = \sum_x \sum_y (x-\bar{x})^p (y-\bar{y})^q f(x,y)$ ,  $p,q=0,1,2,\cdots$  ( $\bar{x} = \frac{m_{10}}{m_{00}}$ ,  $\bar{y} = \frac{m_{01}}{m_{00}}$ ).基于矩的不变性原理

知,对图像可以进行归一化操作.定义图像的协方差矩阵  $\boldsymbol{M}$  为  $\begin{bmatrix} \mu_{20} & \mu_{11} \\ \mu_{11} & \mu_{02} \end{bmatrix}$ ,  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  是  $\boldsymbol{M}$  的特征值,

$[e_{1x}, e_{1y}]^T$  和  $[e_{2x}, e_{2y}]^T$  是对应的特征向量.由文献[7]可得到最终的归一化公式:

$$\begin{bmatrix} x^m \\ y^m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha \\ -\sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{c}{\sqrt{\lambda_1}} & 0 \\ 0 & \frac{c}{\sqrt{\lambda_2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{1x} & e_{1y} \\ -e_{1y} & e_{1x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x-\bar{x} \\ y-\bar{y} \end{bmatrix}. \tag{1}$$

1.2 非下采样剪切波变换(NSST)

剪切波变换(Shearlet 变换)<sup>[8]</sup>集合了许多多尺度分析函数的优良特性,具体表现为:①局部化特性优良,在频域上能够满足紧凑支撑的条件,在空域上具有非常快的衰减性;②能够满足抛物线尺度化;③具有很强的方向敏感性;④剪切波是现有多尺度几何分析中最优的稀疏表示之一<sup>[9]</sup>.

由于剪切波的优良特性,近年来其在图像处理领域得到了广泛的应用.在对图像进行处理时,剪切波需采用离散化的形式. NSST 是剪切波变换的一种特殊形式,它是由非下采样的拉普拉斯塔式变换和多种不同的剪切滤波生成的,其中非下采样的拉普拉斯塔式变换是用来分解不同尺度的图像,而剪切滤波是将图像在不同的方向进行分解.由于图像的分解和重构没有采用下采样和上采样,因此 NSST 具有平移不变性,并且输出的子带图像与原图像大小相同<sup>[6]</sup>.

### 1.3 完全互补码扩频

扩频通信<sup>[10]</sup>系统的抗干扰、抗噪声、保密通信、多址通信和同步等都与伪随机码密切相关,因此在扩频通信中所选取的伪随机码要满足如下几个特性:①强自相关;②弱互相关;③不同码元数平衡相等;④有足够的编码;⑤有尽可能大的复杂度<sup>[11]</sup>. 伪随机序列种类有很多,如 M 序列、Gold 序列、Walsh 序列、完全互补序列等等. 由文献[11]可知,完全互补序列具有最佳的自相关性与互相关性,因此本文采用了一种基于完全互补码的扩频技术.

完全互补序列也称为 CCC 码,一组完全互补序列的构造矩阵可由下式表示:

$$CCC = \begin{bmatrix} C_0^{(0)} & C_1^{(0)} & \cdots & C_{N-1}^{(0)} \\ C_0^{(1)} & C_1^{(1)} & \cdots & C_{N-1}^{(1)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_0^{(M-1)} & C_1^{(M-1)} & \cdots & C_{N-1}^{(M-1)} \end{bmatrix}_{M \times N}, \quad (2)$$

其中  $M$  和  $N$  分别表示完全互补码构造矩阵的行数和列数,  $C$  表示一段完全互补序列. 公式(2)中每行构成一组完整的完全互补序列,即每行与自身形成自相关,每两行序列码之间形成互相关.

## 2 零水印算法设计

### 2.1 零水印构造算法

零水印构造过程如图 1 所示,构造步骤如下:

步骤 1 漫画图像特征提取.

1) 选取  $M \times M$  大小的彩色漫画图像作为载体图像,先将其转换为灰度图像,然后以灰度图像为基础进行图像归一化处理;再选定边缘控制点,利用图像的空间变换,将图像转换成  $M \times M$  大小的标准图像.

2) 对标准图像采用 NSST 得到低频近似图像  $E$ ,其大小与原始图像大小相同.

3) 对低频近似图像  $E$  做二维 DCT 变换,得到大小为  $\frac{M}{2^n} \times \frac{M}{2^n}$  的系数矩阵  $F$ ,其中  $n \times n$  为图像的分块个数,  $n \times n$  分块的像素矩阵  $I(x, y)$  的二维 DCT 变换公式如式(3)和式(4)所示:

$$F(u, v) = \sqrt{\frac{2}{N}} c(u) c(v) \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} I(i, j) \cos \frac{(2i+1)uv}{2N} \cos \frac{(2i+1)v\pi}{2N}, i, j = 0, 1, \dots, N-1, \quad (3)$$

$$\text{其中, } c(x) = \begin{cases} \sqrt{\frac{1}{N}}, & n=0; \\ \sqrt{\frac{2}{N}}, & n=1, 2, \dots, N-1. \end{cases} \quad \text{DCT 逆变换为:}$$

$$I(i, j) = \sum_{u=0}^{N-1} \sum_{v=0}^{N-1} c(u) c(v) F(u, v) \cos \frac{(2i+1)u\pi}{2N} \cos \frac{(2i+1)v\pi}{2N}, u, v = 0, 1, \dots, N-1. \quad (4)$$

经过离散余弦变换后,原始图像的能量得到了进一步压缩,低频中聚集了更多的能量.

4) 将得到的低频子带进行非负矩阵分解(NMF),得到相同大小的基矩阵  $W_{(i)}$  和系数矩阵  $H_{(i)}$ <sup>[12]</sup>,以此进一步提高稀疏性.然后选取基矩阵作为特征,将基矩阵进行块内求和,并计算均值  $\bar{W}$  将之作为阈值.

根据  $W_{(i)}$  中元素与  $\bar{W}$  的大小关系产生极性向量,记为  $W1_{(i)}$ ,即  $W1_{(i)} = \begin{cases} 1, & \text{if } W_{(i)} \geq \bar{W}; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$  最后,进行

二值化处理,得到载体图像的特征矩阵.

步骤 2 水印图像处理.

1) 选取大小为  $N \times N$  的水印图像,对水印图像进行基于完全互补码的扩频处理.首先,选定基础码;然后,根据 LS 码“生成树”递推公式,进行一次递推,得到一个完全互补码(如公式(5)所示);经过一

次递推之后,选取第一、二行完全互补码序列,并将其转换成  $4 \times 4$  大小的矩阵;再选取矩阵的第 2 列作为扩频序列码,并利用该序列码对水印图像做克罗内克积(Kronecker Product) 扩频调制;最后,对扩频后的水印序列进行  $\{0,1\}$  化处理,使水印图像扩大 4 倍.

$$\begin{bmatrix} A_a^1 & B_a^1 \\ A_a^2 & B_a^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_a^1 & A_a^2 & B_a^1 & B_a^2 \\ A_a^1 & \bar{A}_a^2 & B_a^1 & \bar{B}_a^2 \\ A_a^2 & A_a^1 & B_a^2 & B_a^1 \\ A_a^2 & \bar{A}_a^1 & B_a^2 & \bar{B}_a^1 \end{bmatrix}.$$

(5)

2) 为了提高算法的安全性,在水印嵌入前对其进行置乱加密操作. Logistic 映射<sup>[13]</sup> 是一个非线性的迭代方程,虽然它具有确定的形式,不包含任何随机因素,但却能产生完全随机的、对参数  $\mu$  的动态变化和初值  $x_k$  极为敏感的序列,因此本文采用基于 Logistic 映射的混沌置乱方法. 首先,利用 Logistic 映射生成混沌序列  $x_k(k=1,2,\cdots,4N \times N)$ :  $x_{k+1} = \mu x_k(1 - x_k)$ , 其中  $0 \leq \mu \leq 4, x_k \in (0,1), k=0,1,2,3,\cdots$ .  $\mu$  与  $x_k$  可作为系统的密钥,生成一维的混沌置乱序列  $x_{k+1}$ , 并将其二值化为只含有 0 和 1 的序列. 然后,将一维序列转换为二维序列,并与水印图像做异或逻辑运算,由此得到加密后的水印图像,其大小要与载体图像的特征矩阵相同.

步骤 3 零水印构造.

对漫画图像的特征矩阵与处理后的水印图像进行异或逻辑运算,由此得到零水印图像并保存入版权中心.

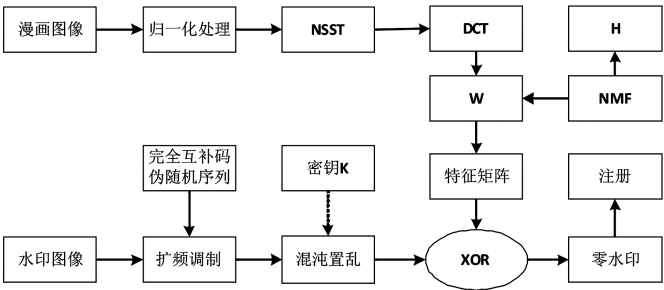


图 1 零水印构造算法图

2.2 零水印提取算法

水印提取的过程即为构造零水印的逆过程,如图 2 所示,提取步骤如下:

步骤 1 漫画图像特征提取. 在零水印提取算法过程中,漫画图像的处理过程与构造零水印时的图像处理过程相同. 首先,将彩色图像转换为灰度图像,然后对其进行图像归一化处理,再将其转化为标准图像;其次,对标准图像作 NSST 和 DCT 提取低频部分;最后,用 NMF 分解提取特征向量作为得到图像的特征矩阵.

步骤 2 将存储入信息库中的零水印与待检测的图像特征矩阵进行异或逻辑运算,得到水印图像.

步骤 3 水印提取. 上述得到的水印图像是杂乱无章的图像,需对其进行混沌反置乱操作进行解密. 将反置乱后的水印图像进行基于完全互补码的扩频解调处理,即可得到隐秘水印图像.

步骤 4 版权验证. 将提取得到的水印图像与原始水印图像进行相似度 NC 和误码率 BER 比较,公式如下:

$$NC = \frac{\sum \sum W(m,n) \times W'(m,n)}{W(m,n) \times W(m,n)},$$

(6)

其中,  $W(m,n)$  为原始水印图像,  $W'(m,n)$  为提取出来的水印图像;

$$BER = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \omega(i) \otimes \hat{\omega}(i),$$

(7)

其中,  $\omega$  为原始信号,  $\hat{\omega}$  为提取出来的水印信号,  $N$  为信号长度.

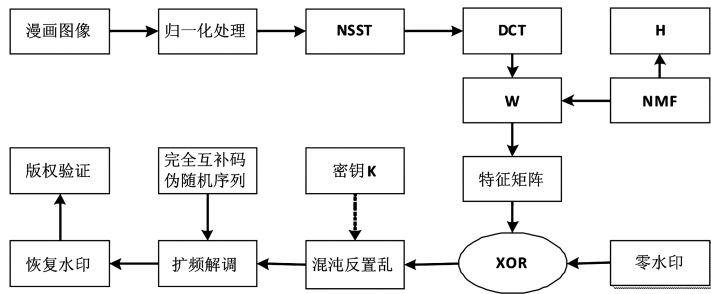


图 2 漫画零水印提取算法图

3 实验结果与分析

3.1 实验环境

仿真实验在 MATLAB2013a 下进行. 选取的数字漫画图像 (载体图像) 大小为  $512 \times 512$  像素, 如图 3 所示. 水印图像是写有“延边大学”字样的二值图像, 大小为  $32 \times 32$  像素, 如图 4 所示. 由于零水印算法不存在传统数字水印算法中鲁棒性与不可感知性相互矛盾的问题, 因此本文只需要通过相似度  $NC$  和误码率  $BER$  来验证算法的鲁棒性即可. 在没有受到攻击的条件下,  $NC$  为 1,  $BER$  为 0.

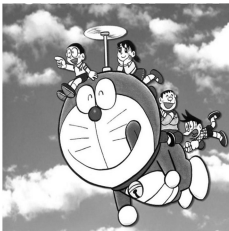


图 3 载体图像

3.2 零水印唯一性验证

验证零水印的唯一性, 就是为了验证由一个载体图像构造出来的零水印是其他图像无法识别的, 它能够间接验证本文零水印算法的可靠性. 表 1 中的图像 2—图像 4 作为宿主图像, 分别与图像 1 构造出来的零水印进行水印提取操作. 表 1 中的  $NC$  值表明, 恢复出来的水印是无法识别的, 由此说明本文算法能够证明数字漫画图像的版权归属.



图 4 原始水印图像

表 1 零水印唯一性验证结果

图像编号	1	2	3	4
数字图像				
提取的水印				
$NC$	1.000 0	0.610 1	0.602 1	0.604 8
$BER/\%$	0.00	33.11	35.45	33.40

3.3 攻击实验





为检验本文算法的鲁棒性强弱, 对载体图像进行高斯噪声、椒盐噪声、旋转、缩放、剪切、JPEG 压缩、邻域滤波攻击实验.

1) 高斯噪声攻击. 对图像进行高斯噪声攻击, 方差分别为 0.005、0.01、0.05 和 0.1, 如表 2 所示. 实







验结果显示,载体图像遇到较强的高斯噪声攻击时,仍然能够提取出清晰的水印,表明本文算法对于高斯噪声攻击具有很强的鲁棒性.

表 2 高斯噪声攻击下提取水印的结果

方差	0.005	0.01	0.05	0.1
攻击后的图像				
提取的水印	延边大学	延边大学	延边大学	延边大学
NC	0.994 7	0.993 4	0.994 7	0.980 1
BER/%	0.39	0.49	0.39	1.46

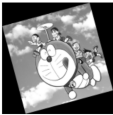
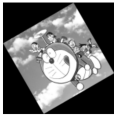
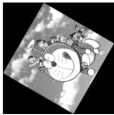
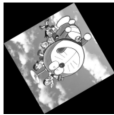
2) 椒盐噪声攻击. 对图像进行椒盐噪声攻击,噪声密度分别为 0.005、0.01、0.05 和 0.1,如表 3 所示. 实验结果显示,载体图像遇到较强的椒盐噪声攻击时,仍然能够提取出清晰的水印,表明本文算法对于椒盐噪声攻击具有很强的鲁棒性.

表 3 椒盐噪声攻击下提取水印的结果

噪声密度	0.005	0.01	0.05	0.1
攻击后的图像				
提取的水印	延边大学	延边大学	延边大学	延边大学
NC	0.998 7	0.997 3	0.992 0	0.990 7
BER/%	0.10	0.20	0.59	0.68

3) 旋转攻击. 对图像进行旋转攻击,对载体图像分别逆时针旋转 15°、30°、60°和 120°,如表 4 所示. 实验结果显示,本文算法能够有效地抵抗旋转攻击,说明本文算法对旋转攻击具有很强的鲁棒性.

表 4 旋转攻击下提取水印的结果

旋转角度/(°)	15	30	60	120
攻击后的图像				
提取的水印	延边大学	延边大学	延边大学	延边大学
NC	0.993 4	0.998 7	0.992 0	0.986 7
BER/%	0.49	0.10	0.59	0.98

4) 缩放攻击. 对图像进行缩放攻击,对载体图像分别缩小为原来的 1/4 倍、1/2 倍,扩大为原来的 2 倍、4 倍,如表 5 所示. 实验结果显示,本文算法能够有效地抵抗缩放攻击,说明本文算法对缩放攻击具有很强的鲁棒性.

5) 剪切攻击. 对图像进行剪切攻击,分别截取载体左上(100×100)、右上(100×100)、右下(150×150)和中间(200×200)部分进行实验,如表 6 所示. 实验结果显示,图像遇到一定程度的剪切攻击后,仍能提取出清晰的水印图像,说明本文算法对剪切攻击具有很强的鲁棒性.

表 5 缩放攻击下提取水印的结果









缩放倍数	1/4	1/2	2	4
攻击后的图像				
提取的水印	延边大学	延边大学	延边大学	延边大学
NC	0.994 7	1.000 0	0.996 0	0.997 3
BER/%	0.39	0.00	0.29	0.20

表 6 剪切攻击下提取水印的结果

剪切区域	左上(100×100)	右上(100×100)	右下(150×150)	中间(200×200)
攻击后的图像				
提取的水印	延边大学	延边大学	延边大学	延边大学
NC	0.941 0	0.861 5	0.923 8	0.923 1
BER/%	5.17	11.42	6.44	6.05

6) JPEG 压缩攻击. 对图像进行 JPEG 压缩攻击,压缩因子分别为 50、40、30、20,如表 7 所示. 实验结果显示,本文算法能够有效地抵抗 JPEG 压缩攻击,说明本文算法对 JPEG 压缩攻击具有很强的鲁棒性.

表 7 JPEG 压缩攻击下提取水印的结果

压缩因子	50	40	30	20
提取的水印	延边大学	延边大学	延边大学	延边大学
NC	1.000 0	0.998 7	0.997 3	0.998 7
BER/%	0.00	0.10	0.20	0.10

7) 邻域滤波攻击. 对图像进行邻域滤波攻击,邻域范围分别为 4 邻域和 8 邻域,如表 8 所示. 实验结果显示,本文算法能够有效地抵抗邻域滤波攻击,说明本文算法对邻域滤波攻击具有很强的鲁棒性.

表 8 邻域滤波攻击下提取水印的结果

邻域范围	4 邻域	8 邻域
提取的水印	延边大学	延边大学
NC	0.994 7	0.998 7
BER/%	0.39	0.10

3.4 算法性能比较

为了进一步验证本文算法在抵抗攻击方面的性能,分别与文献[3]、文献[5]和文献[14]的算法进行仿真实验对比,实验结果如表 9 所示. 从表 9 可以看出,本文算法在抵抗高斯噪声、椒盐噪声、旋转、缩放、JPEG 压缩攻击时鲁棒性均有所提高,而在抵抗剪切攻击时,本文算法的鲁棒性与文献[5]的算法相比较弱.

表 9 算法性能比较

攻击类型	NC 值			
	文献[3]算法	文献[5]算法	文献[12]算法	本文算法
高斯噪声(0.1)	0.900 7	0.984 5	0.973 9	0.985 8
椒盐噪声(0.1)	0.912 8	0.988 7	0.979 8	0.990 7
旋转(30°)	0.936 1	0.923 8	0.899 8	0.998 7
缩放(1/2)	0.922 0	0.982 5	0.973 4	1.000 0
剪切(1/16)	0.940 2	0.977 6	0.920 8	0.943 7
JPEG 压缩(40)	0.905 8	0.988 6	0.924 7	0.998 7

4 结论

本文根据 NSST 能够更好地表达图像边缘部分的特性,提出了一种基于图像归一化和 NSST 的零水印算法.实验结果表明,本文算法对于抵抗高斯噪声、椒盐噪声、旋转、缩放、JPEG 压缩、邻域滤波等攻击时的鲁棒性均超过文献[3]、文献[5]、文献[12]中的结果,具有很强的鲁棒性,但抵抗剪切攻击的鲁棒性与文献[3]相似;因此,如何进一步提高本文算法抵抗剪切攻击的鲁棒性是今后研究的工作.

参考文献:

[1] Amit M, Neelesh M. Adaptive lossless medical image watermarking algorithm based on DCT & DWT[J]. Procedia Computer Science, 2016,78:88-94.

[2] 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,2014,25(4):769-776.

[3] 石海凤.基于边缘特征的漫画及动画零水印技术研究[D].延吉:延边大学,2015:25-35.

[4] Malihe M, Mohammad A Z C. Robust transparent image watermarking with Shearlet transform and bidiagonal singular value decomposition[J]. AEU-International Journal of Electronics and Communication, 2016,70(6):790-798.

[5] 韩绍程,张兆宁,张玉金.基于非下采样剪切波变换和 QR 分解的鲁棒零水印算法[J].光电子·激光,2012,23(10):1957-1964.

[6] Wang Xiang-yang, Liu Yu-nan, Xu Huan, et al. Blind optimum detector for robust image watermarking in nonsub-sampled shearlet Domain[J]. Information Sciences, 2016,372(8):634-654.

[7] Lang Fang-nian, Zhou Ji-liu, Cang Shuang, et al. A self-adaptive image normalization and quaternion PCA based color image watermarking algorithm[J]. Expert Systems with Applications, 2012,39(15):12046-12060.

[8] Labate D, Lim W Q, Kutyniok G, et al. Sparse multidimensional representation using shearlets[C]//Optics & Photonics 2005. International Society for Optics and Photonics, 2005:59140U-29140U-9.

[9] 冯宁.基于 Shearlet 方向性的水印嵌入方法研究[D].西安:西北大学,2014:7-17.

[10] Liu Shi, Hennelly B M, Guo Changliang, et al. Robustness of double random phase encoding spread-space spread-spectrum watermarking technology[J]. Signal Processing, 2015,109:345-361.

[11] 全文吉.基于相关序列的鲁棒水印算法研究[D].延吉:延边大学,2014:22-26.

[12] NIU Wan-hong, PAN Chen. A digital watermarking algorithm based on non-negative matrix factorization and orthogonal projection transformation[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2011,31(6):726-727.

[13] Ye Guodong. Image scrambling encryption algorithm of pixel bit based on chaos map[J]. Pattern Recognition Letters, 2010,31(5):347-354.

[14] Yashar N, Saied H K. Fast watermarking based on QR decomposition in wavelet domain[J]. Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing, 2010,39:127-130.