

基于 Arnold 变换和沃尔什-哈达玛变换的 彩色图像盲水印算法

黄 静, 陈和风

(集美大学计算机工程学院, 福建 厦门 361021)

[摘要] 针对数字水印系统需要兼容不可见性和鲁棒性的问题, 提出一种基于 Arnold 变换和沃尔什-哈达玛变换 (WHT) 的彩色图像盲水印方案。将图像分为 8×8 不重叠的像素块, 对彩色宿主图像进行沃尔什-哈达玛变换。为了增强水印的鲁棒性, 水印图像在嵌入宿主图像前先利用 Arnold 变换进行置乱, 然后将置乱后的水印图像的像素值转为二进制并嵌入 WHT 的变换矩阵中。实验结果表明, 该算法具有较好的不可见性, 在抗噪声、滤波、旋转等攻击方面均具有较好的鲁棒性。

[关键词] 彩色图像; 盲水印; Arnold 变换; 沃尔什-哈达玛变换 (WHT)

[中图分类号] TP 309.2

Blind Watermarking Algorithm of Color Image Based on Arnold Transform and Walsh Hadamard Transform

HUANG Jing, CHEN Hefeng

(College of Computer Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China)

Abstract: Digital watermarking system needs to balance invisibility and robustness. In this paper, a blind watermarking scheme of color image based on Arnold transform and Walsh Hadamard transform (WHT) is proposed. The scheme divides the image into 8×8 non-overlapping pixel blocks and Walsh Hadamard transform the color host image. In order to enhance the robustness of the watermark, before embedding the watermark image into the host image, Arnold transform is used to scramble the watermark image, and then the pixel value of the scrambled watermark image is converted into binary and embedded into the transform matrix of WHT. Experimental results show that the proposed scheme has good invisibility and robustness against noise, cropping, filtering and other attacks.

Keywords: color image; blind watermarking; Arnold transform; Walsh Hadamard transform (WHT)

0 引言

彩色图像水印一直是众多学者们研究的热点问题, 已经提出了许多方法。这些方法主要是基于 RGB 彩色空间和 $YCbCr$ 彩色空间^[1]。RGB 彩色空间与 $YCbCr$ 彩色空间之间可以互相转换^[2-3]。

[收稿日期] 2022-08-31

[基金项目] 福建省自然科学基金项目“基于邻近度面向多数据类型的离群检测算法研究”(2023J01802)

[作者简介] 通信作者: 陈和风 (1982—), 副教授, 硕导, 从事网络安全、密码学、信息隐藏等方向研究。

E-mail: chenhf@jmu.edu.cn

<http://xuebaobangong.jmu.edu.cn/zkb>

2018 年, Loan 等^[4]提出将 RGB 彩色空间转换为 YC_bC_r 彩色空间, 再将水印嵌入亮度分量“Y”中, 然后通过修改宿主图像相邻的 8×8 像素块的 DCT 系数来嵌入加密后的水印以提升算法的鲁棒性。Liu 等^[5]针对 YC_bC_r 图像提出了一种双盲水印方案, 将鲁棒水印嵌入 YC_bC_r 颜色空间, 脆弱水印嵌入在 RGB 颜色空间; 该方案可以抵抗各种攻击并且可以定位篡改区域的图像, 但是无法恢复图像。Roy 等^[6]提出了基于人类视觉系统 (HVS) 的 YC_bC_r 颜色空间的自适应非盲水印方案, 利用 Arnold 变换置乱水印, 结合离散小波变换和奇异值分解进行水印嵌入和提取; 该算法为非盲水印算法, 在实际应用中有一定的局限性。2019 年, Moosazadeh 等^[7]提出了一种适用于 JPEG- YC_bC_r 颜色空间的基于 DCT 的水印方案, 选择“Y”分量嵌入 DCT 系数中, 再计算 DCT 系数矩阵中每一块的方差的复杂性并将水印嵌入最复杂的块元素中; 该算法具有较高的鲁棒性, 但是可嵌入的水印容量较小。

2010 年, Goléa 等^[8]提出通过修改奇异值将水印图像嵌入到宿主图像中, 该算法具有较强的鲁棒性, 但是水印系统的安全性略低。2019 年, Abdulrahman 等^[9]提出了一种基于 DCT-DWT 的 RGB 彩色图像水印方案, 对彩色宿主图像的三个通道分别进行 DCT 变换之后再行 DWT 变换; 将水印图像分块进行 DCT 变换, 然后将 DCT 系数嵌入到宿主图像的 DCT 系数中实现水印的嵌入; 该水印方案在嵌入因子较低的情况下抵抗攻击的鲁棒性较差。2020 年, Zhang 等^[10]提出了一种结合离散傅里叶变换的空间域盲彩色图像水印算法, 根据相邻像素块的离散傅里叶变换 (DFT) 的直流分量 (DC) 之间的相关性, 在三个通道中以可变步长嵌入和提取彩色数字水印。2022 年, Chen 等^[11]提出了一种基于 WHT 变换的彩色图像盲水印算法, 通过调整 WHT 变换的频域系数, 将水印图像嵌入到宿主图像中, 有效提高了水印算法的鲁棒性和水印的不可见性。

在不提高水印算法计算复杂度的情况下, 为了提高水印算法的鲁棒性、不可见性以及安全性, 本文提出了一种基于 Arnold 变换和 WHT 相结合的盲水印方案, 在传统的水印方案上进行了改进, 在执行嵌入过程之前先将水印图像和宿主图像进行分块, 然后进行 WHT 后嵌入水印, 利用分块技术提高了水印的不可见性。在嵌入水印之前使用 Arnold 变换对水印图像进行置乱, 可以提高水印系统的鲁棒性和安全性。

1 Arnold 变换和沃尔什-哈达玛变换的基本工作原理

Arnold 变换是俄国数学家弗拉基米尔·阿诺德 (Vladimir Igorevich Arnold) 在遍历理论研究中提出的一种图像变换方法。因为 Arnold 最初对一幅猫的照片进行了这种变换, 所以它也被称为猫脸变换 (cat 映射)^[12]。利用 Arnold 变换可以把图像中各像素点的位置进行置换来生成一幅新的杂乱的图像, 从而达到加密的目的, Arnold 变换常用于数字盲水印嵌入前对水印图像进行预处理来提高水印算法的安全性和保密性。

对于一幅 $N \times N$ 的图像, Arnold 变换定义为 $\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} (\text{mod } N)$ 。其中: $\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix}$ 为 Arnold 变换的变换矩阵; (x, y) 为原始图像中某一点的像素点, $x, y \in (0, 1, 2, \dots, N-1)$; (x', y') 为置乱后的像素点, N 表示图像的阶数。

利用 Arnold 变换对水印图像进行置乱, 变换的次数可以作为水印系统的密钥, 对于 RGB 颜色空间来说, 每一层的密钥空间的大小为 2^{15} , 因此 RGB 颜色空间三层总的密钥空间的大小为 2^{45} , 所以使用 Arnold 变换来置乱水印图像可以保证水印算法具有较高的安全性和保密性。Arnold 变换具有周期性, 被置乱的水印图像经过一定迭代次数的 Arnold 变换可以恢复到原始水印图像, 该迭代次数即为 Arnold 变换的置乱周期 T 。

WHT 是一种非正弦变换技术。WHT 的核心是哈达玛矩阵, 哈达玛矩阵是由 -1 和 $+1$ 组成的正交矩阵。哈达玛矩阵最大的优点是存在递推关系, 即高阶哈达玛矩阵可以由低阶哈达玛矩阵的

克罗内克积求得。WHT 计算简单, 运算速度比离散傅里叶变换快得多, 被广泛应用于数字图像处理领域。但是 WHT 变换的局限性是使用 WHT 变换处理的图像的像素矩阵必须为 $2^n \times 2^n$ ($n = 1, 2, \dots, n$)。

哈达玛矩阵的一般形式为 $\mathbf{H}_N = \mathbf{H}_{2^n} = \mathbf{H}_2 \otimes \mathbf{H}_{2^{n-1}} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{2^{n-1}} & \mathbf{H}_{2^{n-1}} \\ \mathbf{H}_{2^{n-1}} & -\mathbf{H}_{2^{n-1}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{N/2} & \mathbf{H}_{N/2} \\ \mathbf{H}_{N/2} & -\mathbf{H}_{N/2} \end{bmatrix}$ 。其中:

\otimes 表示克罗内克积。二维 WHT 定义为: $\mathbf{I}(U, V) = \frac{1}{N} \times \mathbf{H}_N \times \mathbf{I}(x, y)$; 二维逆 WHT 定义为: $\mathbf{I}(x, y) = \mathbf{H}_N \times \mathbf{I}(U, V)$ 。 8×8 的像素块的像素矩阵 $\mathbf{I}(x, y)$ 的 WHT 矩阵的一般形式为

$$\mathbf{I}(U, V) = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} & a_{17} & a_{18} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} & a_{27} & a_{28} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} & a_{36} & a_{37} & a_{38} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} & a_{46} & a_{47} & a_{48} \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} & a_{56} & a_{57} & a_{58} \\ a_{61} & a_{62} & a_{63} & a_{64} & a_{65} & a_{66} & a_{67} & a_{68} \\ a_{71} & a_{72} & a_{73} & a_{74} & a_{75} & a_{76} & a_{77} & a_{78} \\ a_{81} & a_{82} & a_{83} & a_{84} & a_{85} & a_{86} & a_{87} & a_{88} \end{bmatrix}。$$

2 提出的水印方案

图像水印方案一般包括水印嵌入和水印提取。水印方案主要是从水印的置乱方法、嵌入位置以及嵌入水印的比例因子等方面来提高水印系统的鲁棒性和不可见性。

2.1 水印嵌入

将宿主图像分为 R、G、B 三个通道, 然后把每个通道的像素矩阵分为 8×8 的不重叠的像素块, 再对每一个像素块进行 WHT 变换。同时将水印图像分为 R、G、B 三个通道, 把每个通道分为 8×8 的不重叠的像素块, 使用 Arnold 变换置乱水印图像, 将置乱后的水印图像的像素值转换为 8 位二进制像素值 $\text{pix}_j^i = \{b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6, b_7, b_8\}$ 。其中, $i = 0, 1, 2$ 分别表示 R 通道、G 通道、B 通道; $j = 0, 1, 2, \dots, 63$ 为像素块中的像素编号。由于第 7 行和第 8 行元素的微小变化不会对图像质量产生过大的影响, 不会对人眼的视觉效果产生影响, 所以将八位二进制像素值嵌入 WHT 矩阵的第 7 行和第 8 行的元素中。执行逆 WHT 变换分别得到三个颜色通道上的 8×8 的不重叠的像素块的像素矩阵, 合并每一个颜色通道上的所有 8×8 的像素块, 最后合并三个颜色通道的图像即可得到嵌入水印的宿主图像。

2.2 水印提取

将嵌入水印的宿主图像分为 R、G、B 三个通道, 然后把每个通道的像素矩阵分为 8×8 的不重叠像素块, 再对每一个像素块进行 WHT 变换; 选择 R、G、B 三个通道中带有水印的像素块提取水印位, 将二进制像素值转为十进制, 并使用置乱密钥利用 Arnold 逆变换恢复 R、G、B 三个通道的水印图像, 最后合并三个通道提取的水印图像即可得到完整的水印图像。水印的提取过程可看成是水印嵌入过程的逆过程。水印提取过程的具体步骤如下: 1) 将水印图像分为 8×8 的不重叠的像素块, 计算每一块像素矩阵的第 7 行和第 8 行的差值 $d'_i = |c_{7i} - c_{8i}|$; 2) 提取嵌入的二进制水印位 $b'_i = [d'_i] \bmod 2$; 3) 合并所有 8×8 的像素块的像素值, 执行逆 Arnold 变换即可得到提取的水印图像。

3 实验结果及分析

3.1 实验环境

本文所有实验均使用一台英特尔四核 4.5 GHz CPU, 16 GB 内存的计算机来完成, 实验是在 MATLAB R2020a 上完成的。

3.2 数据集

本文仿真实验使用的宿主图像为 7 张选自 USC-SIPI 图像库的 512×512 的彩色图像, 如图 1 所示; 本文实验使用的水印图像的大小为 64×64 , 如图 2 所示。

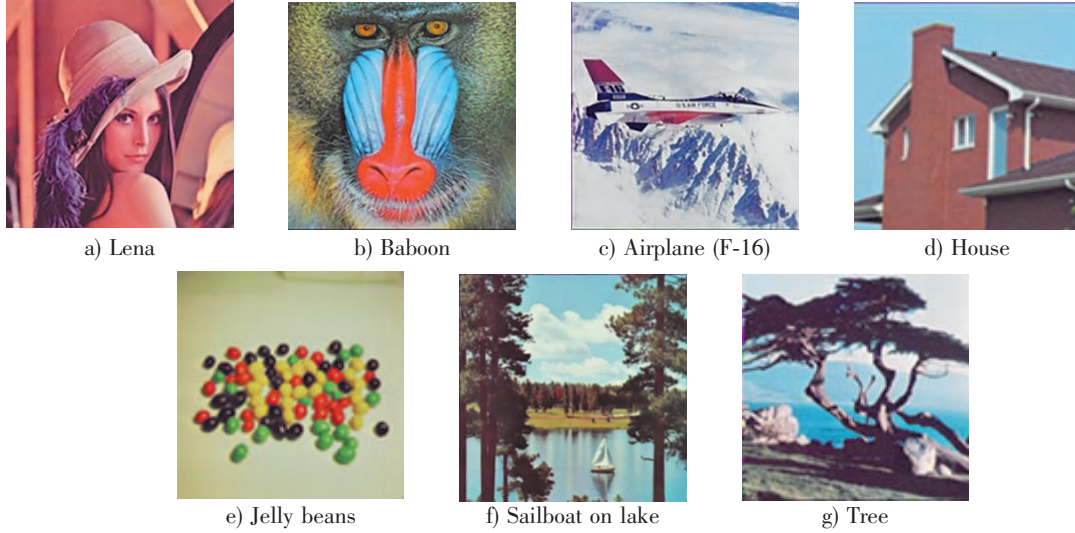


图 1 宿主图像

Fig.1 Host image

3.3 水印系统的性能指标

水印系统的主要性能指标是不可见性和鲁棒性。水印的不可见性通常用峰值信噪比 (PSNR) 和结构相似性 (SSIM) 来衡量。PSNR 用于计算两幅图像之间的相似程度, PSNR 越高, 说明两幅图像越相似, 水印的不可见性就越好。当 PSNR 大于 35 dB 时可以满足不可见性。SSIM 的取值范围为 0~1, 越接近 1, 说明水印的不可见性越好。

PSNR 的定义为

$$\text{PSNR}_i = \frac{MN \max(\text{HI}_{m,n,i}^2)}{\sum_{m,n} (\text{HI}_{m,n,i} - \text{HI}_{m,n,i}^*)^2},$$

$$\text{PSNR} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \text{PSNR}_i.$$

其中: $\text{HI}_{m,n,i}$ 为原始宿主图像第 i 层中坐标为 (m,n) 的像素点; $\text{HI}_{m,n,i}^*$ 为嵌入水印的宿主图像第 i 层中坐标为 (m,n) 的像素点; M 和 N 分别为宿主图像的行数和列数; PSNR_i 为第 i 层的 PSNR 值。

Wang 等^[13]提出可用 SSIM 来衡量图像的质量。SSIM(HI, HI^*) = $l(\text{HI}, \text{HI}^*)c(\text{HI}, \text{HI}^*)s(\text{HI}, \text{HI}^*)$ 。其中: $l(\text{HI}, \text{HI}^*)$ 为亮度比较函数; $c(\text{HI}, \text{HI}^*)$ 为对比度比较函数; $s(\text{HI}, \text{HI}^*)$ 为结构相似度比较函数; HI 为原始宿主图像; HI^* 为嵌入水印后的宿主图像。彩色图像的结构相似度为

$$\text{SSIM} = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 \text{SSIM}_j.$$

其中: j 表示彩色图像的层数。

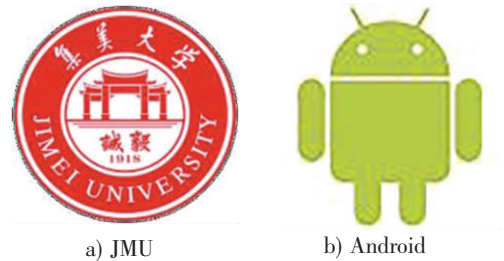


图 2 水印图像

Fig.2 Watermarking image

水印系统的鲁棒性通常用提取的水印和原始水印之间的归一化系数 (NC) 来衡量。通过比较从受到攻击后的嵌入水印的宿主图像中提取的水印图像和原始水印图像, 可衡量嵌入水印的宿主图像在受到攻击后是否仍然可以正确提取水印图像。归一化相关系数为

$$NC = \frac{\left\{ \sum_{j=1}^3 \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N [W(x,y,i) \times W'(x,y,i)] \right\}}{\left(\sqrt{\sum_{j=1}^3 \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N [W(x,y,i)]^2} \sqrt{\sum_{j=1}^3 \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N [W'(x,y,i)]^2} \right)^{\circ}}$$

其中: $W(x,y,i)$ 为原始水印图像第 i 层中坐标为 (x,y) 的像素点; $W'(x,y,i)$ 为提取的水印图像第 i 层中坐标为 (x,y) 的像素点。

SSIM 和 NC 的取值范围在 0 到 1 之间, 越接近 1, 水印系统的性能就越好。

3.4 实验结果

3.4.1 水印的不可见性测试

不同宿主图像嵌入图 2a 水印图像“JMU”的 PSNR、SSIM 和 NC 值如表 1 所示。不同宿主图像嵌入图 2b 水印图像“Android”的 PSNR、SSIM 和 NC 值如表 2 所示。

表 1 嵌入水印图像“JMU”的 PSNR、SSIM 和 NC 值

Tab. 1 The PSNR, SSIM and NC values after embedding the watermark image“JMU”

性能指标	Lena	Baboom	Airplane (F-16)	House	Jelly beans	Sailboat on lake	Tree
PSNR/dB	49.330 80	49.155 50	49.351 20	49.478 60	50.139 00	49.245 30	49.394 20
SSIM	0.999 70	0.999 53	0.995 23	0.999 21	0.999 17	0.999 10	0.998 42
NC	1.000 00	0.999 88	0.999 79	1.000 00	0.999 85	0.999 90	0.999 92

表 2 嵌入水印图像“Android”的 PSNR、SSIM 和 NC 值

Tab. 2 The PSNR, SSIM and NC values after embedding the watermark image“Android”

性能指标	Lena	Baboom	Airplane (F-16)	House	Jelly beans	Sailboat on lake	Tree
PSNR/dB	49.324 90	49.162 10	49.374 10	49.480 30	50.084 00	49.259 00	49.386 70
SSIM	0.999 70	0.999 53	0.995 25	0.999 21	0.999 21	0.999 10	0.998 40
NC	1.000 00	0.999 88	0.999 79	1.000 00	0.999 82	0.999 90	0.999 92

由表 1、表 2 可以得出, 宿主图像在嵌入不同的水印图像后得到的图像的 PSNR 均大于 49 dB, SSIM 和 NC 值均大于 0.99, 表明该水印方案有较好的不可见性。

对不同宿主图像采用不同水印方案的平均 PSNR、SSIM 和 NC 值如表 3 所示。

表 3 不同水印方案的平均 PSNR、SSIM 和 NC 值

Tab. 3 The average PSNR, SSIM and NC values of different watermarking schemes

性能指标	方案								
	Lena			Airplane (F-16)			House		
	本文	文献[11]	文献[14]	本文	文献[11]	文献[14]	本文	文献[11]	文献[14]
PSNR/dB	49.327 85	40.768 70	49.204 20	49.362 65	39.523 80		49.479 45	43.962 40	49.401 90
SSIM	0.999 70	0.979 80	0.994 80	0.995 24	0.980 60		0.999 21	0.981 03	0.993 13
NC	1.000 00		1.000 00	0.999 79			1.000 00		1.000 00

由表 3 可以看出, 当宿主图像为 “Lena” “House” 时, 嵌入不同的水印图像得到的平均 PSNR、SSIM、NC 值均优于参考文献 [14] 提出的水印方法。当宿主图像为 “Lena” “Airplane (F-16)” “House” 时, 嵌入不同的水印图像得到的平均 PSNR、SSIM 值均优于参考文献 [11] 提出的方案。

3.4.2 水印的鲁棒性测试

为了验证算法的鲁棒性, 对嵌入水印的宿主图像进行不同的攻击, 如裁剪、旋转、高斯滤波、高斯噪声、椒盐噪声、亮度减弱。各种攻击和对应的参数如表 4 所示。

表 4 各种攻击和对应的参数

Tab.4 Different attacks and corresponding parameters

攻击类型	参数			
十字裁剪	25%	40%	50%	60%
旋转	10°	20°	30°	40°
高斯滤波	3 × 3	5 × 5	7 × 7	9 × 9
高斯噪声	0.001	0.002	0.004	0.006
椒盐噪声	0.001	0.002	0.003	0.004
亮度减弱	像素值减 10	像素值减 30	像素值减 60	像素值减 90

在鲁棒性测试实验中, 可以使用 Stirmark 工具来攻击嵌入水印的图像。Stirmark 工具是由剑桥大学开发的一款用于数字水印研究的测试工具, 能够检测水印算法的鲁棒性。给定一张嵌入水印后的图像, Stirmark 会自动生成大量攻击后的图像, 可以直接用得到的攻击后的图像来进行水印提取的步骤。以图 1a 为例, 嵌入图 2a 所示的水印图像, 嵌入水印后的图像在不同的攻击下提取的水印图像如图 3 所示。



图 3 不同攻击下提取的水印图像

Fig.3 Watermark images extracted under different attacks

通常用 NC 值的大小来衡量不同水印方案抵抗攻击的鲁棒性,以宿主图像“Lena”为例,进行多次仿真实验,得到不同水印方案的 NC 值如表 5 所示。

为了比较水印图像嵌入不同的宿主图像之后抵抗各种攻击的鲁棒性,以图 2b 作为水印图像,嵌入图 1 所示的不同的宿主图像进行了多次实验,在表 4 中所列各种攻击下提取的水印的 NC 值如图 4~9 所示。

表 5 不同水印方案的 NC 值对比

Tab. 5 NC values comparison of different watermarking schemes

方案	本文	文献[11]			文献[14]
		水印 1	水印 2	水印 3	
旋转 20°	0.907 04				0.892 0
十字裁剪(40%)	0.814 15				0.781 3
椒盐噪声(0.002)	0.990 04	0.996 4	0.996 6	0.993 2	0.993 8
高斯噪声(0.002)	0.916 56	0.876 7	0.902 9	0.850 1	
高斯滤波(3×3)	0.989 97	0.954 4	0.977 1	0.938 3	0.907 5
亮度减弱(像素值减 30)	0.997 41				0.995 1

在图 4 中,随着裁剪比例的增大,提取的水印的 NC 值逐渐减小。当裁剪比例为 0.25 时,将水印图像嵌入图 1 中的各个宿主图像后提取的水印的 NC 值均大于 0.85,但是随着裁剪比例的增加,NC 值越来越小;当裁剪比例为 0.6 时,提取的水印的 NC 值仅位于 0.65 和 0.7 之间,说明该水印方案在抗裁剪攻击方面的鲁棒性不强。在图 5 中,随着旋转角度的增加,提取的水印的 NC 值逐渐减小,但是均大于 0.86。在图 6 中,不同的高斯噪声下提取的水印的 NC 值均大于 0.86。在图 7 中,不同强度的椒盐噪声下提取的水印的 NC 值均大于 0.96。在图 8 中,不同的高斯滤波攻击下提取的水印的 NC 值均大于 0.97。在图 9 中,亮度减弱不同的像素值时提取的水印值均大于 0.94。实验表明,该水印方案在抵抗旋转、噪声、亮度减弱方面具有较好的鲁棒性。

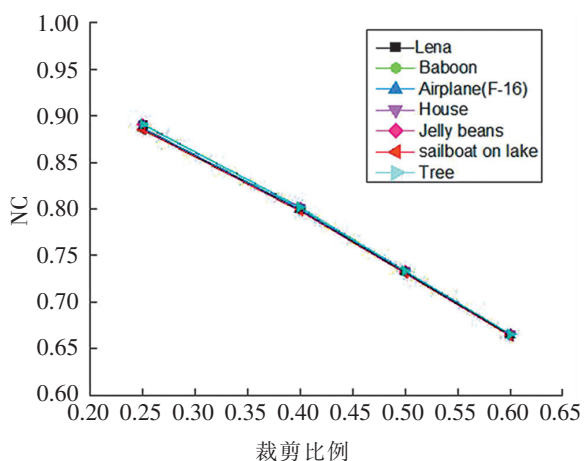


图 4 不同裁剪比例下提取的水印的 NC 值
Fig.4 The NC value of the watermark extracted under different cropping ratios

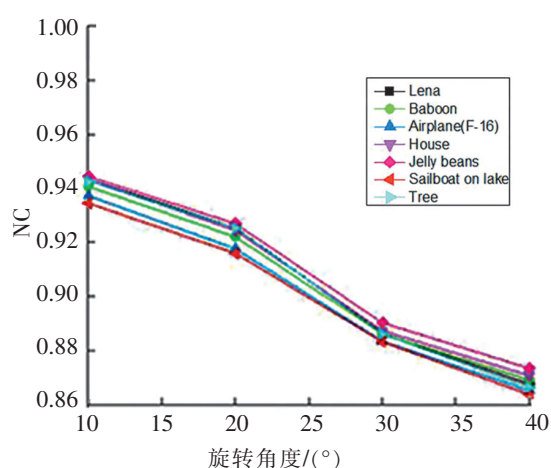


图 5 不同旋转角度下提取的水印的 NC 值
Fig.5 The NC value of the watermark extracted under different rotation angles

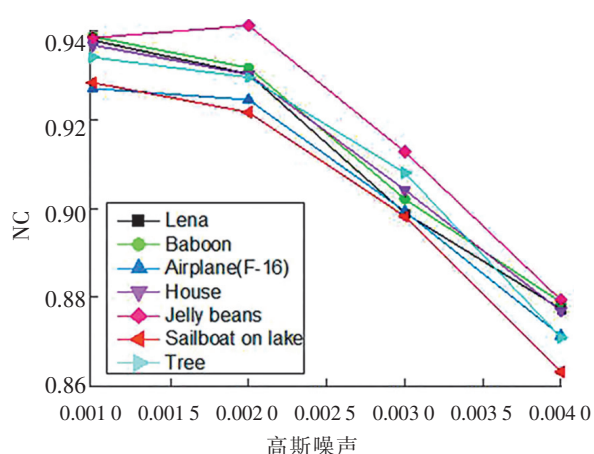


图 6 不同高斯噪声下提取的水印的 NC 值

Fig.6 The NC value of the watermark extracted under different gauss noises

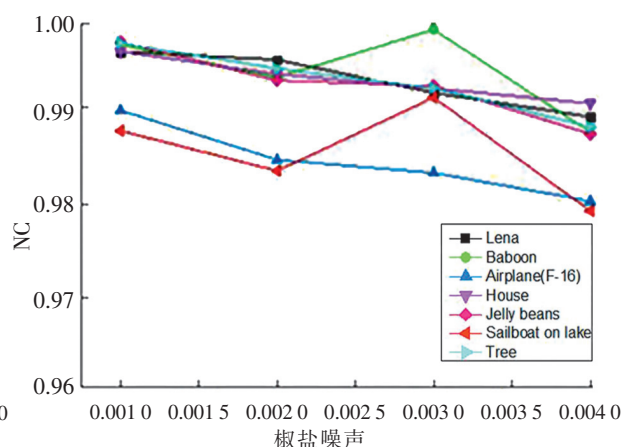


图 7 不同椒盐噪声下提取的水印的 NC 值

Fig.7 The NC value of watermark extracted under different salt and pepper noise

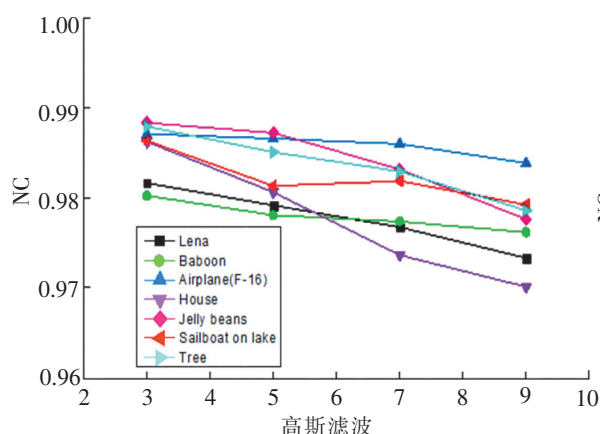


图 8 不同的高斯滤波下提取的水印的 NC 值

Fig.8 The NC value of the watermark extracted under different Gaussian filtering

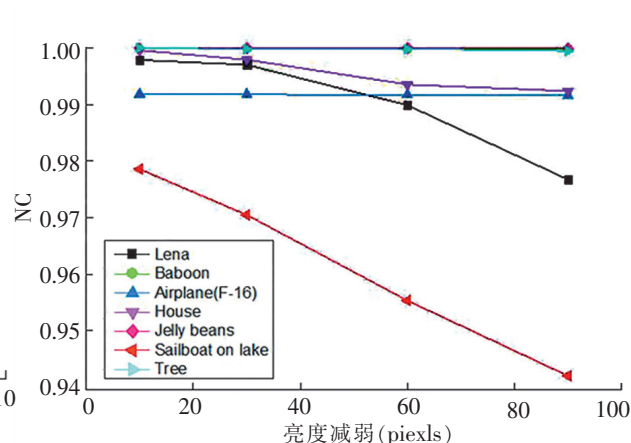


图 9 亮度减弱不同的像素值时提取的水印的 NC 值

Fig.9 The NC value of the watermark extracted under different Darken values

4 结论

本文提出了一种基于 Arnold 变换和沃尔什-哈达玛变换的彩色图像水印方案, 该方案利用 WHT 变换的能量聚集效应将水印图像嵌入 WHT 变换矩阵的最后两行, 保证了水印的不可见性。在嵌入水印之前利用 Arnold 变换对水印图像进行置乱, 保证了水印系统的保密性和安全性, 并且不需要依靠原始的宿主图像和水印图像即可提取水印。实验结果表明, 本文提出的水印方案的 PSNR 均大于 49 dB, SSIM 值均大于 0.995, 具有较好的不可见性, 优于文献 [11] 和文献 [14] 提出的水印方案。在旋转和高斯噪声攻击下提取的水印的 NC 值均大于 0.86, 在亮度减弱、椒盐噪声、高斯滤波攻击下提取的水印的 NC 值均大于 0.9, 表明该方案在抵抗旋转、噪声、滤波攻击方面具有较好的鲁棒性。本文提出的水印方案在遭受高斯噪声、滤波攻击后提取的水印的 NC 值高于文献 [11]; 在椒盐噪声、旋转攻击下提取的水印的 NC 值略低于文献 [11]; 在旋转、滤波、高斯噪声等攻击下的鲁棒性优于文献 [14] 提出的水印方案。大量的仿真实验证实, 本文提出的水印系统在不可见性和鲁棒性方面均具有较好的性能和较大的实用价值。在今后的研究中, 将考虑如何进一步提高水印系统抗裁剪和旋转攻击的鲁棒性。

[参考文献]

- [1] MAHTO D K, SINGH A K. A survey of color image watermarking: state-of-the-art and research directions[J]. Computers & Electrical Engineering, 2021, 93(3): 107255.
- [2] GONZALEZ R C. Digital image processing[M]. Chennai, India: Pearson Education, 2009.
- [3] POYNTON C A. A technical introduction to digital video[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1996.
- [4] LOAN N A, HURRAH N N, PARAH S A, et al. Secure and robust digital image watermarking using coefficient differencing and chaotic encryption[J]. IEEE Access, 2018, 6: 19876-19897.
- [5] LIU X L, LIN C C, YUAN S M. Blind dual watermarking for color images' authentication and copyright protection[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2018, 28(5): 1047-1055.
- [6] ROY A, MAITI A K, GHOSH K. An HVS inspired robust non-blind watermarking scheme in YCbCr color space [J]. International Journal of Image and Graphics, 2018, 18(3): 1850015.
- [7] MOOSAZADEH M, EKBATANIFARD G. A new DCT-based robust image watermarking method using teaching-learning-based optimization[J]. Journal of Information Security and Applications, 2019, 47: 28-38.
- [8] GOLÉA N E, SEGHIR R, BENZID R. A blind RGB color image watermarking based on singular value decomposition[C]// IEEE/ACS International Conference on Computer Systems & Applications. Hammamet: IEEE, 2010: 1-5.
- [9] ABDBULRAHMAN A K, OZTURK S. A novel hybrid DCT and DWT based robust watermarking algorithm for color images [J]. Multimedia Tools and Applications, 2019, 78(12): 17027-17049.
- [10] ZHANG X T, SU Q T, YUAN Z H, et al. An efficient blind color image watermarking algorithm in spatial domain combining discrete fourier transform[J]. Optik, 2020, 219: 165272.
- [11] CHEN S Y, SU Q T, WANG H Y, et al. A high-efficiency blind watermarking algorithm for double color image using walsh hadamard transform[J]. Visual Computer, 2022, 38(6): 2189-2205.
- [12] AVEZ A, ARNOLR V I. Ergodic problems of classical mechanics[M]. New Jersey: Benjamin, 1968.
- [13] WANG Z, BOVIK A C, SHEIKH H R, et al. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(4): 600-612.
- [14] PRABHA K, SHATHEESH SAM I. An effective robust and imperceptible blind color image watermarking using WHT[J]. Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences, 2022, 34(6): 2982-2992.

(责任编辑 彭海滨 英文审校 黄振坤)