

DOI:10.16136/j.joel.2022.08.0840

基于图变换和 DWT-SVD 的鲁棒图像水印算法

闻 斌, 张天骐*, 熊 天, 吴 超

(重庆邮电大学 通信与信息工程学院, 重庆 400065)

摘要:针对图像水印算法在攻击强度较大时鲁棒性差的问题,提出了一种基于图变换(graph-based transform,GBT)、离散小波变换(discrete wavelet transform,DWT)和奇异值分解(singular value decomposition,SVD)的鲁棒图像水印算法。首先对载体图像进行不重叠分块处理,挑选出像素方差值较高的子块进行DWT得到其低频系数矩阵,然后对低频系数矩阵依次进行GBT和SVD得到奇异值矩阵,最后将水印信息嵌入到奇异值矩阵的最大奇异值中。实验结果表明,Pirate图像结构相似度(structural similarity,SSIM)达到0.97以上时,本文算法能有效抵抗噪声、滤波、JPEG压缩、剪切和交换行列等攻击,归一化互相关系数(normalization coefficient,NC)值均在0.9以上。

关键词:图像水印;图变换;小波变换;奇异值分解;像素方差值

中图分类号:TP911.7 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-0086(2022)08-0-0879-08

Robust image watermarking algorithm based on graph-based transform and DWT-SVD

WEN Bin, ZHANG Tianqi*, XIONG Tian, WU Chao

(School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications (CQUPT), Chongqing, 400065, China)

Abstract: Aiming at the problem of poor robustness of image watermarking algorithms when the attack is strong, a robust method based on graph-based transform (GBT), discrete wavelet transform (DWT) and singular value decomposition (SVD) is proposed. First, we perform non-overlapping block processing on the carrier image, select the sub-blocks with higher pixel variance values and perform DWT on each sub-block to obtain its low-frequency coefficient matrix, and then perform GBT and SVD on the low frequency coefficient matrix in turn to obtain the singular value matrix, and finally embed the watermark information to the largest singular value matrix. The experimental results show that when Pirate image structure similarity (SSIM) reaches 0.97 or more, the algorithm in this paper can effectively resist attacks such as noise, filtering, JPEG compression, cropping, and exchange of ranks, and the normalization coefficient (NC) value is all above 0.9.

Key words: image watermark; graph-based transform (GBT); discrete wavelet transform (DWT); singular value decomposition (SVD); pixel variance value

1 引言

随着数字多媒体作品(视频、音频和图像)可以通过互联网进行上传和下载,需要防止未经授权的多媒体作品在互联网上大范围传播,信息隐

藏技术是解决此类问题最有效的方法^[1]。信息隐藏是将重要信息嵌入数字媒体的冗余部分,通常嵌入的消息是不可察觉的,又必须保持数字媒体的保真度。本文研究的是将重要信息隐藏到数字图像中去,图像水印有以下3方面的应用:版权保

* E-mail:15236627651@163.com

收稿日期:2021-12-13 修订日期:2021-01-20

基金项目:国家自然科学基金(61671095,61702065,61701067,61771085)、信号与信息处理重庆市市级重点实验室建设项目(CSTC2009CA2003)、重庆市自然科学基金项目(cstc2021jcyj-msxmX0836)和重庆市教育委员会科研项目(KJ1600427, KJ1600429)资助项目

护、标记、内容认证。

现有的图像水印算法大多都是在变换域中进行,变换域图像水印算法最大的优点是嵌入的水印能量信息能够遍布在整幅图像空间域的所有像素点之中,具有较强的抗恶意攻击和抗信号处理的能力。文献[2]提出了一种基于多分辨率小波分析的图像水印算法,嵌入的水印对各种信号处理攻击和压缩攻击都具有鲁棒性,但提取水印需要载体图像的参与。文献[3]通过修改复小波变换域(complex wavelet transform, CWT)中图像奇异值来嵌入水印信息,CWT相较于实小波变换域有更高的嵌入容量,然而对高斯噪声攻击和直方图均衡攻击的鲁棒性较差。文献[4]提出了一种基于 Schur 分解的新型水印方法,这种方法对大部分的同步和异步信号处理攻击都具有高鲁棒性,但对 JPEG 压缩攻击的性能较差。文献[5-6]通过在变换域中嵌入多个相同水印来获得水印图像的高鲁棒性,但由于重复嵌入水印图像,导致载体图像峰值信噪比(peak signal-to-noise ratio, PSNR)降低。文献[7]提出了一种基于 DCT(discrete cosine transform)和奇异值分解(singular value decomposition, SVD)的鲁棒性混合水印方案,但恢复出的水印图像视觉效果上较差。文献[8]结合使用了 DCT 和离散小波变换(discrete wavelet transform, DWT)以及 Arnold 置乱,为水印图像提供了鲁棒性和不可见性,但由于采用乘性嵌入规则,载体图像微小的变化就会导致水印图像大范围失真。文献[9-10]将载体图像的特征信息与原始水印异或生成零水印,在不损害载体图像的情况下获得良好的鲁棒性。但提取水印时需要版权信息库中注册水印的参与,增大了算法复杂度。文献[11]提出了一种基于图像块的水印方法,利用 SVD 和冗余小波变换,结合由熵值表示的人类视觉系统(human visual system, HVS)特征,选择较低 HVS 熵值的子块来嵌入水印,该算法实现了水印图像的不可见性,但在图像攻击强度较大时鲁棒性不佳。文献[12]提出了一种基于图变换(graph-based transform, GBT)和群稀疏性的深度图去噪算法,对于含有加性高斯白噪声的单深度贴图,该算法比其他算法的图像 PSNR 高出 2.37 dB。文献[13]将图变换应用到视频编码,在不影响编码器和解码器运行时间的情况下,可以实现相当大的编码改进,BD 速率平均降低约 0.4%。文献[14]提出了一种 GBT 的音频压缩算法,该方法为音频引入一种适合的图矩阵,然后将音频帧投影到图矩阵特征向量组成的正交矩阵上得到其稀疏系数,文献[15]将图变换算法进行了

优化,并将其应用到图像压缩领域,该算法优于传统的基于 DCT 变换的图像压缩算法。

从上述讨论可以看出,由于图像攻击的复杂性,水印算法很难保证在不同强度的攻击下都具有很强的鲁棒性。针对上述问题,本文提出了一种 GBT 和 DWT-SVD 的鲁棒图像水印算法,该算法的主要思想是利用图变换使载体图像低频子图能量更加集中,结合 DWT^[16]和 SVD,保证图像在遭受不同强度的攻击时,其中的水印信息能够基本保持不变;同时利用像素方差值挑选出遮蔽性较好的图像子块,保证水印图像的视觉不可见性。

2 基本原理

2.1 图变换

给定一个具有 n 个采样点的一维信号 s ,可以创建一个图 $G = \{V, E, s\}$,其中 V 和 E 是图的顶点和边, $s \in \mathbf{R}^{N \times 1}$ 是一维信号,图矩阵定义为 $G \in \mathbf{R}^{N \times N}$ 。对于图 G ,邻接矩阵 A 中的元素可以通过式(1)得到:

$$A_{i,j} = \begin{cases} a_{ij}, & \text{if } (i,j) \in E \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (1)$$

式中, $a_{i,j}$ 是图 G 中 i 和 j 之间的边的权重。度矩阵 $D \in \mathbf{R}^{N \times N}$ 是对角矩阵,其元素定义如下:

$$D_{ij} = \begin{cases} \sum a_{ij}, & \text{if } i = j \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}. \quad (2)$$

图拉普拉斯矩阵 L 定义为:

$$L = D - A. \quad (3)$$

矩阵 L 是实对称矩阵,并且基于图谱理论,该矩阵的特征值分解(Eigenvalue decomposition, EVD)将获得一组实非负特征值,表示为 $\Lambda = \{\lambda_1, \dots, \lambda_n\}$,以及一组对应的独立正交特征向量,表示为 $V = \{v_1, \dots, v_n\}$ 。矩阵 L 可表示为:

$$L = V \Lambda V^T, \quad (4)$$

然后利用 $V = \{v_1, \dots, v_n\}$ 去相关图 G 上定义的信号 s ,即:

$$c = V^T s, \quad (5)$$

式中, $c \in \mathbf{R}^{N \times 1}$ 为近似稀疏变换系数矩阵。

本文算法对图像信号 I 进行二维图变换,消除图像信号相邻像素之间的相关性,让图像低频段的能量更加集中。二维图变换的定义如式(6)所示:

$$\begin{cases} C_{1d} = \text{GBT}(I) \\ C_{2d} = \text{GBT}(C_{1d}^T) \end{cases}, \quad (6)$$

式(6)表示对图像信号 I 的行向量进行 GBT 变换得到二维矩阵 C_{1d} ;然后对 C_{1d} 的列向量去相关,得到对 I 进行二维图变换后的矩阵 C_{2d} 。图 1 为 Lena 图像低频部分经过 4×4 分块图变换后得到的系数块组

成的图像和颜色图。从图 1 可以看出, Lena 图像低频部分经过图变换后每个小块的能量主要集中在左上角。对于整幅图像而言,背景区域是平坦区域,基本没有纹理信息,能量分布较少,而帽子和头发区域纹理信息丰富,能量分布较多。

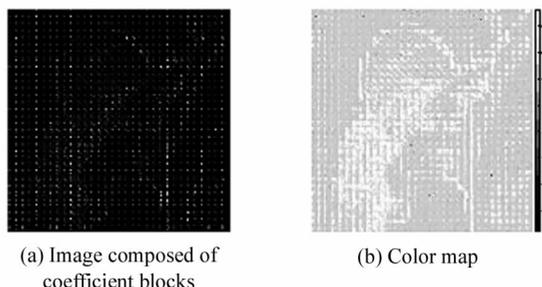


图 1 图变换效果图

Fig. 1 Diagram of figure transformation effect

2.2 SVD

SVD 是矩阵分析中最重要的工具之一,它可以将一个矩阵分解为 3 个矩阵的乘积,对于一个大小为 $m \times n$ 的矩阵 I , SVD 可表示为:

$$I = U_{m \times n} \begin{pmatrix} \delta_1 & & & & & \\ & \delta_2 & & & & \\ & & \ddots & & & \\ & & & \delta_{n-1} & & \\ & & & & \delta_n & \end{pmatrix} V_{n \times m}^H, \quad (7)$$

式中, $U_{m \times n}$ 为左奇异矩阵, $\text{diag}(\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_{n-1}, \delta_n)$ 为奇异值矩阵, $\delta_1 \geq \delta_2 \geq \dots \delta_{n-1} \geq \delta_n$, 最大奇异值为 δ_1 , $V_{n \times m}^H$ 为右奇异矩阵。图像经过 SVD 后能用较少奇异值表达出图像中的大部分信息,在图像去噪和图像压缩领域中具有重要的作用。

2.3 像素方差值

本文算法利用像素方差值来挑选嵌入水印信息的图像子块。像素方差值高的图像子块表示子块具有高复杂纹理结构,具有更好的遮蔽性。像素方差定义如式(8)所示:

$$S^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^v (V_i - \bar{V})^2, \quad (8)$$

式中, v 表示所选子块的像素个数, V_i 表示所选子块的每个像素值, \bar{V} 表示所选子块的平均像素值, N 表示载体图像像素的总数量。图像子块的像素方差值按降序排列。

3 水印的嵌入和提取

3.1 水印嵌入流程

水印的嵌入流程如图 2 所示。

步骤一: 首先将 $M \times M$ 大小的载体图像 I 进行 8×8 不重叠分块处理, 得到分离后的子块 $I_{i,j}$ ($i, j = 1, 2, \dots, M/8$), 然后将 $N \times N$ 大小的水印图像 W 进行 Arnold 置乱并降维为一维序列 $wl_{1,k}$ ($k = 1, 2, \dots, N \times N$)。

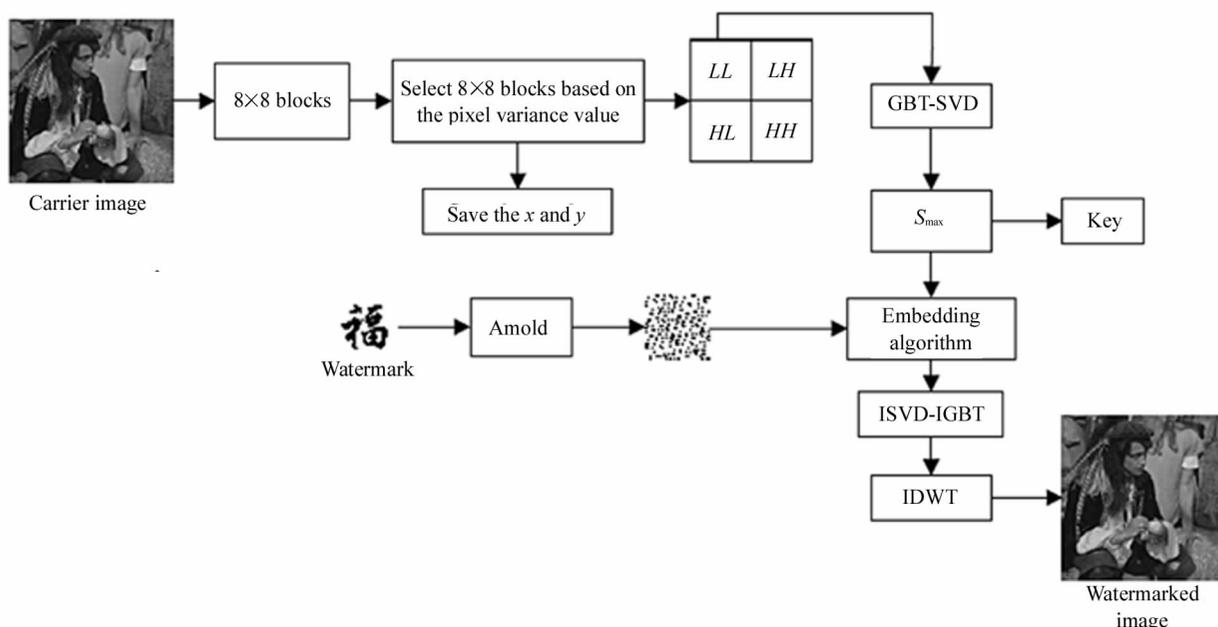


图 2 嵌入水印过程

Fig. 2 Embedding the watermark process

步骤二:计算每个图像子块 $I_{i,j}$ 的像素方差值, 选用前 $N \times N$ 个高像素方差值的子块并保存其坐标位置。

步骤三:对选定块进行一级 DWT 分解,小波基为 haar,得到 DWT 分解后的低频系数矩阵 $LL_{m,n}$, 其中 m,n 为保存的坐标位置。

步骤四:对低频系数 $LL_{m,n}$ 进行 GBT 变换得到 $C_{m,n}$ 。

步骤五:对 $C_{m,n}$ 进行 SVD 分解,根据 $C_{m,n}$ 的最大奇异值 S_{max} 生成一维序列作为密钥 Key。按照式(9)所示的嵌入算法将一维水印序列 $wl_{1,k}$ 嵌入到选定块的最大奇异值 S_{max} 中:

$$S_{w_{max}} = \begin{cases} S_{max} + \partial & \text{if } wl(1,k) = 1 \\ S_{max} - \partial & \text{if } wl(1,k) = 0 \end{cases}, \quad (9)$$

式中, $k=1,2,\dots,N \times N$, S_{max} 表示选定块原始的最大奇异值, $S_{w_{max}}$ 表示选定块嵌入水印后的最大奇异值, ∂ 表示水印图像的嵌入强度。

步骤六:对嵌入水印信息的子块进行逆 SVD 分

解、逆 GBT 变换、逆 DWT 分解,得到嵌入水印信息后的载体图像 I^* 。

3.2 水印提取流程

水印的提取流程如图 3 所示。

步骤一:将受到攻击的载体图像 I^* 分成 8×8 大小的不重叠块。

步骤二:利用保存的坐标位置定位嵌入了水印信息的子块。

步骤三:重复 3.1 中的步骤三到步骤五,根据得到最大奇异值 S_{max}^* 生成一维序列 Key^* 。

步骤四:将 Key^* 与密钥 Key 按照式(10)所示的提取算法进行比较得到一维水印序列 wl^* , 并将其升维为 $N \times N$ 大小的二维矩阵 W^* 。

$$wl^*(1,k) = \begin{cases} 1 & \text{if } Key^*(1,k) > Key(1,k) \\ 0 & \text{if } Key^*(1,k) \leq Key(1,k) \end{cases}, \quad (10)$$

式中, $k=1,2,\dots,N \times N$ 。

步骤五:将得到的 W^* 进行 Arnold 逆置乱,提取

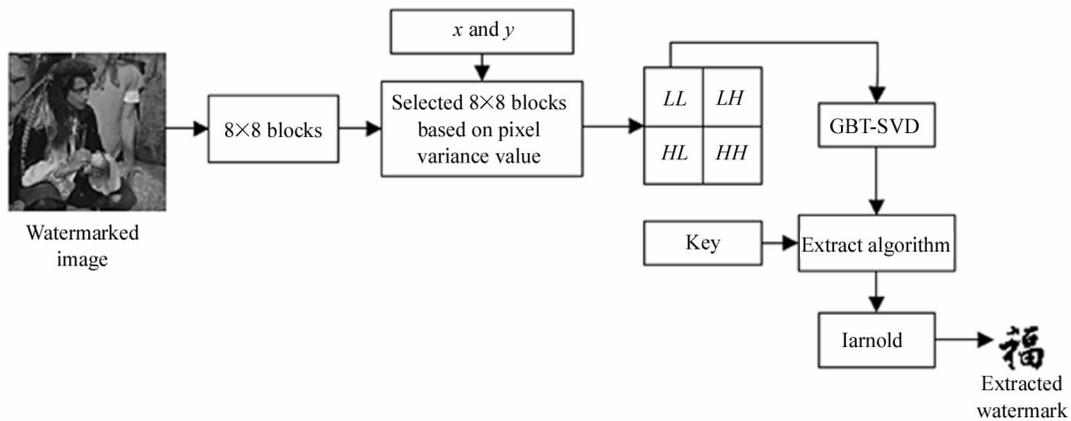


图 3 提取水印过程

Fig. 3 Extract the watermark process

原始水印图像 W 。

4 实验结果与分析

本文使用的仿真工具为 Matlab2018a,操作系统为 Window10。选取的载体图像分别为 512×512 的标准灰度图像 Pirate、Lena、Baboon 和 Room,水印图像为 32×32 的含有“福”字样的二值图像。仿真实验中,选用的图像子块数 $C=32 \times 32=1024$,嵌入强度设置为 38。

4.1 不可见性分析

结构相似度(structural similarity index measure,SSIM)是一种用以衡量两张数字图像相似度的

指标。其中一张是无失真图像,另一张是失真图像时,二者的 SSIM 值可以作为失真图像的品质影响衡量指标。相比于 PSNR,SSIM 在图像品质的衡量上更符合人眼对图片质量的判断。给定两张图像 x, y ,两者的结构相似度被定义为:

$$SSIM(x,y) = [l(x,y)]^\alpha [c(x,y)]^\beta [s(x,y)]^\gamma, \quad (11)$$

式中, $l(x,y)$ 为比较亮度, $c(x,y)$ 为比较对比度, $s(x,y)$ 为比较结构,利用参数 α, β, γ 来调整定义中 3 个部分所占的比重,一般情况下设 $\alpha=\beta=\gamma=1$ 。

无攻击条件下嵌入水印信息的载体图像以及提取的水印图像如表 1 所示,从表 1 中可以看到,嵌入

水印后的载体图像 Pirate、Lena、Baboon、Room 在无攻击的条件下的 SSIM 值分别为 0.977 3、0.965 4、0.992 5、0.986 6,提取的水印图像归一化互相系数 (normalization coefficient, NC) 值均为 1,具有很高

的视觉不可见性。Baboon 的 SSIM 值略高于其他载体图像,原因在于 Baboon 具有更复杂的边缘结构和纹理特征,在相同的嵌入强度下相较于其他图像有更好的遮蔽性。

表 1 无攻击时水印的嵌入和提取

Tab. 1 Embedding and extraction of watermark without attack

Carrier image	Pirate	Lena	Baboon	Room
Watermarked image (SSIM)				
	SSIM=0.977 3	SSIM=0.965 4	SSIM=0.992 5	SSIM=0.986 6
Extracted watermark (NC)				
	NC=1	NC=1	NC=1	NC=1

4.2 鲁棒性分析

鲁棒性表示水印图像在遭受水印攻击后的稳定性。为了衡量本文算法的鲁棒性,模拟了不同强度、不同类型的攻击对水印图像的影响,并通过 NC 和误码率 (bit error rate, BER) 来评估提取的水印。NC 值、BER 值的取值范围在 0—1 之间,当提取的水印更接近原始水印时,NC 值更接近 1,BER 值更接近 0。NC 值和 BER 值的定义如式(12)所示:

$$\begin{cases} NC = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \mathbf{W}(i,j)\mathbf{W}^*(i,j)}{\sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \mathbf{W}(i,j)^2 \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \mathbf{W}^*(i,j)^2}} \\ BER = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \mathbf{W}(i,j) \oplus \mathbf{W}^*(i,j)}{M \times N} \end{cases} \quad (12)$$

式中,⊕表示异或运算,M 和 N 表示水印图像的行列数和列数,mathbf{W}^* 表示提取的水印,mathbf{W} 表示原始水印。

为了统计方便,将常见的图像攻击方式用相对应的符号进行表示,各符号含义如表 2 所示。

为了验证本文算法的鲁棒性,对嵌入水印的载体图像分别进行常规攻击以及几何攻击等测试,利用提取水印图像的 NC 值来衡量算法的鲁棒性。仿真结果如表 3、表 4 所示。

从表 3 可以看出,本文算法在面对不同强度的噪声攻击、滤波攻击、JPEG 压缩攻击以及移动模糊攻击方面都具有良好的性能,NC 值均在 0.91 以上。尤其在遭受 JPEG 压缩攻击时,提取的水印图像 NC 值最高达到了 1,原因在于将水印嵌入到载体图像的

抗压缩部分,在图像遭受压缩攻击后可以最大程度上保留水印的原始信息。但在面对直方图均衡攻击时性能较差,主要原因在于直方图攻击是通过改变图像直方图来改变图像中各像素的灰度值,图像像素灰度值的大量改变导致提取出错。

表 2 各符号含义

Tab. 2 The meaning of each symbol

Symbol	Mean
A	Gaussian noise
B	Salt & Peppers
C	Speckle noise
D	Mean filter
E	Median filter
F	JPEG
G	JPEG2000
H	Moving blur
I	Histogram equalization
J	Cut
K	Ration
L	Exchange ranks
M	Mosaic attack
T_R	Top Right
E_W	Extracted watermark

从表 4 可知,本文算法对不同攻击参数的剪切攻击、交换行列攻击、马赛克攻击以及部分组合攻击都具有很强的抵抗力,最高 NC 值达到 0.998 1。但在面对旋转攻击时性能不佳,主要原因在于旋转攻击范围大改变了图像像素值的原始位置,导致提取

时出现大范围错误。

表 3 提取水印对常规攻击的鲁棒性(NC)

Tab.3 Robustness of watermark extraction against conventional attacks (NC)

Attack	Parameter	Pirate	Lena	Baboon	Room
A	0.008	0.974 4	0.953 4	0.962 3	0.958 4
	0.01	0.946 2	0.948 9	0.958 5	0.949 6
B	0.008	0.995 0	0.991 3	0.996 3	0.994 4
	0.01	0.985 1	0.988 2	0.995 0	0.991 9
C	0.008	0.996 9	0.994 4	0.997 5	0.997 4
	0.01	0.995 7	0.993 8	0.995 7	0.995 8
D	3×3	0.964 2	0.965 4	0.967 3	0.955 8
	5×5	0.942 3	0.948 0	0.947 4	0.921 1
E	3×3	0.991 3	0.996 3	0.990 1	0.988 2
	5×5	0.942 9	0.963 6	0.934 3	0.943 6
F	50	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
	90	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
G	50	0.950 8	0.949 0	0.842 8	0.913 6
	90	0.847 2	0.857 7	0.803 4	0.821 7
H	9	0.933 1	0.910 5	0.950 7	0.924 6
I	—	0.686 6	0.680 3	0.695 2	0.695 6

为了验证本文算法的有效性,将本文所示 DWT-GBT-SVD 算法与文献[17]所示的 RDWT-SVD 算法以及传统的 DWT-SVD 算法进行对比。选取 Pirate 图像作为载体图像,在保证 3 种算法嵌入水印后载体图像 SSIM 值相等的前提下,对其进行常规攻

表 4 提取水印对几何攻击及组合攻击的鲁棒性(NC)

Tab.4 Robustness of watermark extraction against geometric attacks and combined attacks (NC)

Attack	Parameter	Pirate	Lena	Baboon	Room
J	Top left 1/16	0.976 2	0.977 5	0.975 0	0.974 3
	Center 1/16	0.972 4	0.968 7	0.970 5	0.969 9
	Center 1/4	0.896 0	0.891 8	0.893 4	0.894 7
K	Top right 1/4	0.904 4	0.902 3	0.889 1	0.900 8
	2°	0.690 8	0.699 5	0.703 2	0.685 2
L	5°	0.612 9	0.633 1	0.632 8	0.636 8
	(1,20) row	0.993 2	0.998 1	0.993 8	0.999 4
	(1,20)column	0.992 6	0.993 8	0.998 8	0.998 1
F+J	50+T_R 1/16	0.976 2	0.977 5	0.975 0	0.974 3
C+J	0.01+T_R1/4	0.897 7	0.891 3	0.899 5	0.897 7
M	8×8	0.969 3	0.971 1	0.987 6	0.949 4
	16×16	0.915 9	0.921 8	0.957 1	0.907 1

击以及几何攻击,利用 BER 值与提取的真实水印图像来评估算法的鲁棒性,具体结果如表 5 所示。从表 5 可以看出,RDWT-SVD 算法在抗直方图均衡攻击具有较强的鲁棒性,BER 值仅有 0.005 9,且在视觉效果上也明显优于本文算法。但本文算法在面对其他类型的攻击时性能均优于 RDWT-SVD 算法,尤其在抗滤波攻击时,本文算法的 BER 值仅有 0.055 7 与 0.013 7,而 RDWT-SVD 算法达到了 0.210 9 与 0.157 2,提取的水印图像在视觉效果上也明显优于 RDWT-SVD 算法。传统的 DWT-SVD 算法在面对

表 5 提取水印的 BER 值与真实图像对比

Tab.5 BER value of the extracted watermark vs. real image

Attack	Parameter	RDWT-SVD	DWT-SVD	DWT-GBT-SVD
		E_W(BER)	E_W(BER)	E_W(BER)
A	0.01	 0.039 1	 0.096 7	 0.075 2
B	0.01	 0.025 4	 0.024 4	 0.016 6
C	0.01	 0.011 7	 0.005 9	 0.002 9
D	3×3	 0.210 9	 0.042 0	 0.055 7
E	3×3	 0.157 2	 0.014 6	 0.013 7
F	50	 0.000 0	 0.000 0	 0.000 0
G	50	 0.380 9	 0.171 9	 0.076 2
H	9	 0.062 5	 0.152 3	 0.102 5
I	-	 0.005 9	 0.308 6	 0.433 6
J	Top left 1/16	 0.030 3	 0.052 7	 0.037 1
K	2°	 0.535 2	 0.464 8	 0.425 8
L	(1,20) rows	 0.010 7	 0.008 8	 0.010 7
M	8×8	 0.210 9	 0.062 5	 0.047 9

均值滤波攻击和交换行列时性能优于本文算法, BER 值仅有 0.0420 和 0.0088,但本文算法在面对其他类型的攻击时性能均优于 DWT-SVD 算法,且拥有更好的视觉效果,原因在于本文利用图变换将图像低频段能量更集中,嵌入的水印信息相对于 DWT-SVD 算法拥有更强的鲁棒性。由以上分析可以看出,本文提出的图像水印算法是有效且鲁棒的。

5 结 论

本文引入图变换和像素方差值,结合 DWT 和 SVD,提出了一种基于图像块处理的鲁棒性图像水印算法。该算法利用图变换和方差像素值使载体图像低频子图能量更加集中以及挑选出遮蔽性较好的图像子块,大大降低了不同强度的攻击对水印图像的影响。通过对比实验可以看出,Pirate 图在抵抗常规攻击和几何攻击时的平均误码率均小于对比算法,且提取的水印图像视觉效果更好。但算法在抗直方图均衡攻击与抗旋转攻击时性能不佳,在下一步的研究中,将进一步提升这方面的性能。

参考文献:

- [1] ALSALAMI M A T, AI-AKAIDI M M. Digital audio watermarking: survey[C]//Foundations for Successful Modelling & Simulation, June 9-11, 2003, Nottingham, England, UK. England: Society of Modelling and Simulation International, 2003: 19.
- [2] WANG H J, LI N. An algorithm of digital image watermark based on multiresolution wavelet analysis[C]//Proceedings of 2005 IEEE International Workshop on VLSI Design and Video Technology, May 28-30, 2005, Suzhou, China. New York: IEEE, 2005: 272-275.
- [3] MANSOURI A, MAHMOUDI AZNAVEH A, TORKAMANI AZAR F. SVD-based digital image watermarking using complex wavelet transform[J]. *Sadhana*, 2009, 34(3): 393-406.
- [4] SEDDIK H, SAYADI M, FNAIECH F. A new blind image watermarking method based on shur transformation [C]//2009 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, November 3-5, 2009, Porto, Portugal. New York: IEEE, 2009: 1967-1972.
- [5] SEDDIK H, SAYADI M, FNAIECH F, et al. A new multi-dimensions image watermarking method based on multi-watermarks embedding and neural network segmentation[J]. *Applied Mathematical Sciences*, 2007, 1(39): 1927-1939.
- [6] HU K, LI C, HU J P, et al. Robust multiple watermarking algorithm for color image via BEMD and DCT[J/OL]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*: 1-16. (2021-06-15)[2021-11-08]. <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2021.0214>.
胡坤,李聪,胡建平,等.基于 BEMD 与 DCT 的彩色图像多重水印鲁棒算法[J/OL]. *北京航空航天大学学报*: 1-16. (2021-06-15)[2021-11-08]. <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2021.0214>.
- [7] SVERDLOV A, DEXTER S, ESKICIOGLU A M. Robust DCT-SVD domain image watermarking for copyright protection: embedding data in all frequencies[C]//2005 13th European Signal Processing Conference, September 04-08, 2005, Antalya, Turkey. New York: IEEE, 2005: 1-4.
- [8] SHETH R K, NATH V V. Secured digital image watermarking with discrete cosine transform and discrete wavelet transform method[C]//2016 International Conference on Advances in Computing, Communication, & Automation (ICACCA) (Spring), April 8-9, 2016, Dehradun, India. New York: IEEE, 2016: 1-5.
- [9] WU D Y, ZHAO J, WANG G P, et al. An image zero watermarking technology based on ameliorated singular value and subblock mapping[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(20): 2010002.
吴德阳,赵静,汪国平,等.一种基于改进奇异值和子块映射的图像零水印技术[J]. *光学学报*, 2020, 40(20): 2010002.
- [10] WU D Y, TANG Y, ZHAO W, et al. Zero watermarking algorithm based on Curvelet-DWT-SVD[J]. *Journal of Yan-shan University*, 2020, 44(1): 38-48.
吴德阳,唐勇,赵伟,等.基于 Curvelet-DWT-SVD 的零水印算法[J]. *燕山大学学报*, 2020, 44(1): 38-48.
- [11] ERNAWAN F, KABIR M N. A blind watermarking technique using redundant wavelet transform for copyright protection[C]//2018 IEEE 14th International Colloquium on Signal Processing & Its Applications (CSPA), March 9-10, 2018, Penang, Malaysia. New York: IEEE, 2018: 221-226.
- [12] HU Wei, LI Xin, CHEUNG G, et al. Depth map denoising using graph-based transform and group sparsity[C]//2013 IEEE 15th International Workshop on Multimedia Signal

Processing (MMSP), September 30-October 2, 2013, Pula, Italy. New York: IEEE, 2013: 1-6.

- [13] EGILMEZ H E, CHAO Y H, ORTEGA A. Graph-based transforms for video coding[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2020, 29: 9330-9344.
- [14] FARZANEH M, TOROGHI R M, ASGARI M. Audio compression using graph-based transform[C]//2018 9th International Symposium on Telecommunications (IST), December 17-19, 2018, Tehran, Iran. New York: IEEE, 2018: 410-415.
- [15] FRACASTORO G, THANOU D, FROSSARD P. Graph transform optimization with application to image compression[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2020, 29: 419-432.
- [16] GANIC E, ESKICIOGLU A M. Robust DWT-SVD domain

image watermarking: Embedding data in all frequencies [C]//Proceedings of the 2004 Multimedia and Security Workshop on Multimedia and Security-MM&Sec' 04, September 20-21, 2004, Magdeburg, Germany. New York: ACM Press, 2004: 166-174.

- [17] ERNAWAN F, KABIR M N. A block-based RDWT-SVD image watermarking method using human visual system characteristics[J]. The Visual Computer, 2020, 36(1): 19-37.

作者简介:

张天骐 (1971—),男,博士后,教授,硕士/博士生导师,主要从事通信信号的调制解调、盲处理等方面的研究。