

文章编号: 2095-2163(2022)02-0044-06

中图分类号: TP309.7

文献标志码: A

基于 DWT-SVD 鲁棒盲水印算法研究

张 阳, 卿粼波, 何小海

(四川大学 电子信息学院, 成都 610065)

摘要: 本文通过对小波变换与奇异值分解的研究, 实现一种基于离散小波变换和奇异值分解(DWT-SVD)的奇偶量化嵌入水印算法, 可实现水印盲提取。为解决水印安全性问题, 使用 Arnold 变换对水印进行加密; 在传统离散小波变换基础上, 进行奇异值分解, 利用图像的奇异值良好的稳定性, 提高图像的鲁棒性; 在图像奇异值基础上, 进行奇偶量化嵌入和提取水印, 可实现水印盲提取; 为了进一步提高抗攻击性, 在图像的各个频段都嵌入水印, 通过加权融合提取水印。仿真和攻击实验结果表明, 该算法的抗椒盐噪声性能有一定提高。

关键词: Arnold; 小波变换; 奇异值分解; 水印盲提取; 鲁棒性

Research and application of robust watermarking algorithm based on DWT-SVD

ZHANG Yang, QING Linbo, HE Xiaohai

(College of Electronic Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

[Abstract] Through the research of wavelet transform and singular value decomposition, a watermarking algorithm based on DWT-SVD is realized, which can realize blind extraction of watermark. In order to solve the security problem of watermark, Arnold transform is used to encrypt the watermark. On the basis of traditional discrete wavelet transform, singular value decomposition (SVD) is used to improve the image's anti attack ability. On the basis of singular value, the watermark is embedded and extracted by parity quantization, which can achieve blind extraction. In order to further improve the anti-attack ability, the watermark is embedded in each frequency band of the image, and the watermark is extracted by weighted fusion. Simulation and attack experiment results show that the robustness of the algorithm is improved compared with other algorithms.

[Key words] Arnold; wavelet transform; singular value decomposition; blind watermark extraction; robustness;

0 引言

互联网技术的迅速发展, 极大的促进了媒体信息的传播, 但也让篡改者有机可乘。针对创作者的版权保护, 一种有效的方法是数字水印技术^[1]。数字水印将版权信息嵌入到传输的图像数据中, 这些图像数据与嵌入版权信息前肉眼观察无差别, 即便篡改者攻击嵌入图像也能大体提取出水印图, 能有效保护创作者版权。

现代数字水印技术发展迅速, 出现了各种水印算法, 传统最低有效位(LSB)算法实现原理简单, 透明性好, 但鲁棒性差, 嵌入水印的图像稍受频率域攻击就无法提取准确的水印^[2]。变换域水印算法的出现大大改善了这一问题。李文娜等^[3]应用离散余弦变换(DCT)算法较为成熟, 具有一定的抗攻击性, 但 DCT 效应导致图像块效应严重, 对于原图质量要求高的场景并不适用; 以燕鲲鹏^[4]研究的分块

数字图像水印算法为代表的离散小波变换(DWT)主流算法, 对 JPEG2000 等有损压缩的攻击具有更强的鲁棒性, 但提取水印需要原宿主图或者原水印图, 无法实现水印盲提取, 其透明性和鲁棒性有进一步提升的空间。轮廓波(Contourlet)变换在小波变换的基础进一步发展, 吴静^[5]研究的基于 Contourlet 变换的图像数字水印算法, 相比小波变换有更加优良的抗攻击性, 但仍然不能实现盲提取水印, 并且对于原图有更高要求。

本文在 DWT-SVD 算法研究基础上, 通过在不同频段嵌入水印, 提取时利用各个频段对原图的估计影响因子进行加权提取, 融合成新的水印图。其中, 给各个频段进行奇异值分解, 利用奇偶嵌入, 将水印的奇偶性嵌入奇异值中, 再进行逆奇异值分解(SVD), 得到嵌入水印图。在对原图影响可以接受的情况下, 实现了更好的抗椒盐攻击效果, 而且实现了水印图像的盲提取。

作者简介: 张 阳(1996-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 电子科学与技术; 卿粼波(1982-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 图像处理、图像/视频编码通信、嵌入式系统; 何小海(1964-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 图像处理与信息系统、机器视觉与智能系统。

通讯作者: 卿粼波 Email: qing_lb@scu.edu.cn

收稿日期: 2021-10-15

1 理论基础

1.1 算法框图

传统 DWT 加水印算法,如图 1 所示。由于图像能量主要集中在低频部分,传统 DWT 算法只将水

印低频二阶小波变换低频(LL2)分量信息加入到原图低频 LL2 分量,并未考虑水印中存在的高频分量的影响,提取的水印在鲁棒性上存在一定缺陷。因此,本文将水印高频信息分别加入到原图对应高频分量信息中,算法框架如图 2 所示。

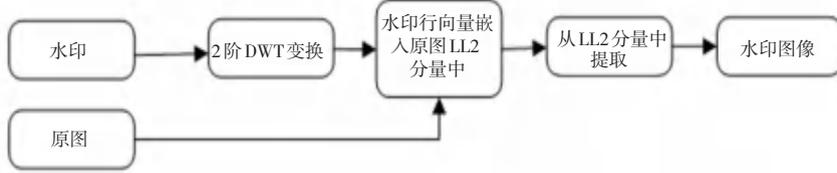


图 1 传统 DWT 算法

Fig. 1 Traditional DWT algorithm

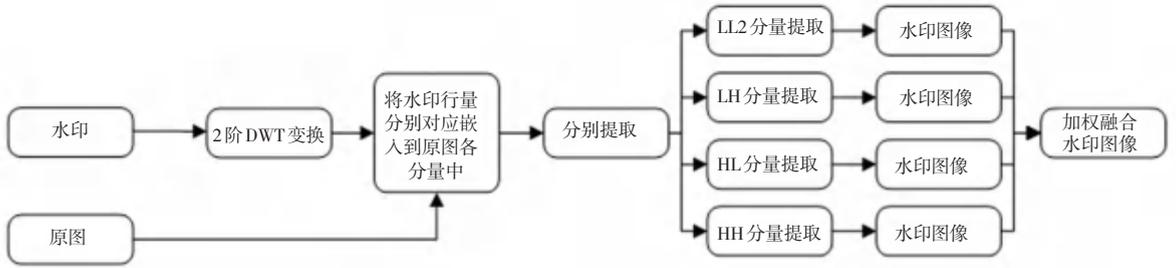


图 2 算法框架

Fig. 2 Algorithm block diagram

1.2 奇异值分解

奇异值分解应用于正交矩阵中,是一种线性代数工具。矩阵的 SVD 分解定义:

H 、 U 、 V 都是二维矩阵, H 的大小 $M \times N$; U 的大小 $M \times M$; V^T 的大小 $N \times N$ 。奇异值公式 (1)。

$$H = U \begin{matrix} \sigma \\ \vdots \\ 0 \end{matrix} V^T \quad (1)$$

其中,

$\Sigma = \text{diag}(\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_r)$; $|\delta_i| = \sigma_i$; $\delta_i \in C$; $\sigma_i (i = 1, 2, 3, \dots, r)$ 是矩阵 H 的正奇异值; $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_r$ 为对角矩阵的参数。

对于二维图像 $I(N \times N)$ 的 SVD 分解,公式 (2):

$$I = U \times S \times V^T \quad (2)$$

其中, U 、 S 、 V 都是 $N \times N$ 的二维矩阵,且 S 是奇异值的对角矩阵。

图像的奇异值矩阵具有较好的稳定性,当图像被施加小的扰动,其奇异值变化不大^[6],且在奇异值上嵌入水印不会损害图像的几何特性^[7]。本文取原图二维小波变换后的低中高频 8×8 块作奇异值变换,得到矩阵 S ,取 $S(0,0)$ 作为计算后的奇异值,再嵌入水印值。

1.3 奇偶嵌入

奇偶嵌入的目的是将水印的奇偶性质嵌入原图中,从而可以对已经嵌入图像分析奇偶性,得到水印的值,实现水印盲提取。本文采用二值图像作为水印图像,奇值为 1,偶值为 0。把计算得到的奇异值设为 f ,把二值水印图像的值设为 w ,嵌入后的值设为 s ,本文通过取整除法 $\text{Math.floor}(f/20)$ 计算出原图奇异值的奇偶性,奇偶嵌入对照见表 1。

表 1 奇偶嵌入对照表

Tab. 1 Comparison table of parity embedding

原图奇异值奇偶性	原图奇异值	二值水印的值	嵌入水印后值
奇数	f	0	$(f/20 + 1) * 20$
奇数	f	1	f
偶数	f	0	f
偶数	f	1	$(f/20 + 1) * 20$

提取水印时根据各频段计算奇异值,判断 $\text{Math.floor}(f/20)$ 奇偶性得到原水印图,实现水印图像盲提取。

2 水印的嵌入与提取

2.1 水印的嵌入

实验选用 512×512 的灰度图线作为宿主图像,

64×64 的二值图像作为水印图像,水印嵌入过程图,如图 3 所示。水印嵌入算法具体描述如下:

(1) 已求得 64×64 矩阵的 Arnold 置换周期为 48,对原始水印图像置换 24 次得到加密的水印图像,并将其转换为一个 1×256 的行向量 $water$,长度为 256;

(2) 对宿主图像进行二阶小波变换,分别对 LL_2 低频段、 LH_1 中频、 HL_1 中频、 HH_1 高频进行处理,得到各频段的 $n \times n \times 256$ 三维块,如原图 512×512 大小,那么 LL_2 可以处理为 $8 \times 8 \times 256$ 的三维块, LH_1 、 HL_1 、 HH_1 都可以处理为 $16 \times 16 \times 256$ 的三维块;

(3) 遍历水印行向量,对 LL_2 低频段取 8×8 块(中高频段取 16×16 块)求最大奇异值,作为参数 f ,取对应水印位置值 w ,根据表 1 计算得到该位置嵌入水印后的奇异值。对 HL_1 、 LH_1 、 HH_1 3 个频段的三维块分别采用上述方法进行嵌入处理。如对 HL_1 频段,假如遍历到第 k 次,对一个 16×16 的面进行 SVD 奇异值计算,取对角线第一个奇异值,也即最大奇异值作为 f ,再根据表 1 计算得到该位置嵌入水印后的奇异值;

(4) 对步骤(3)生成的奇异值进行 SVD 逆分解,得到 8×8 的面或 16×16 的面组成三维块,再分别对应还原为各个频段,最后进行小波逆变换,得到嵌入加密水印的图像。

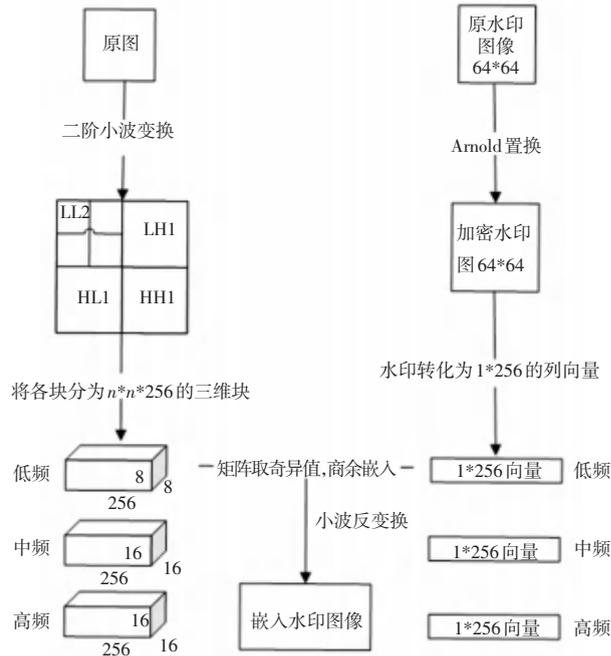


图 3 水印嵌入过程图

Fig. 3 Process diagram of watermark embedding

2.2 水印提取过程

以 512×512 的含水印图像进行说明,默认水印

是 64×64 大小的二值图像,提取水印过程不需要水印原图,水印提取过程如图 4 所示。提取步骤如下:

(1) 对已嵌入图像进行二阶小波变换,提取出 LL_2 、 LH_1 、 HL_1 、 HH_1 4 个频段块,并分别对这些频段块处理为三维块,此例 LL_2 可以经处理为 $8 \times 8 \times 256$ 的三维块, LH_1 、 HL_1 、 HH_1 都可以处理为 $16 \times 16 \times 256$ 的三维块;

(2) 从 1 遍历到 256,加入遍历到第 k 次,对每个频段三维块第 k 个面进行奇异值计算,得到最大奇异值 f ,通过取整除法 $\text{Math.floor}(f/20)$ 得出水印该位置的值,因此可以得到相应 LL_2 、 LH_1 、 HL_1 、 HH_1 4 幅水印图 $water_1, water_2, water_3, water_4$;

(3) 按照各个频段加权决定最后水印图,加权水印图计算公式(3):

$$water = water_1 \times a_0 + water_2 \times a_1 + water_3 \times a_2 + water_4 \times a_3 \quad (3)$$

(4) 已求得 64×64 大小矩阵 Arnold 置乱周期为 48,将步骤(3)得到的加密图继续置乱 24 次,得到可辨认的水印图。

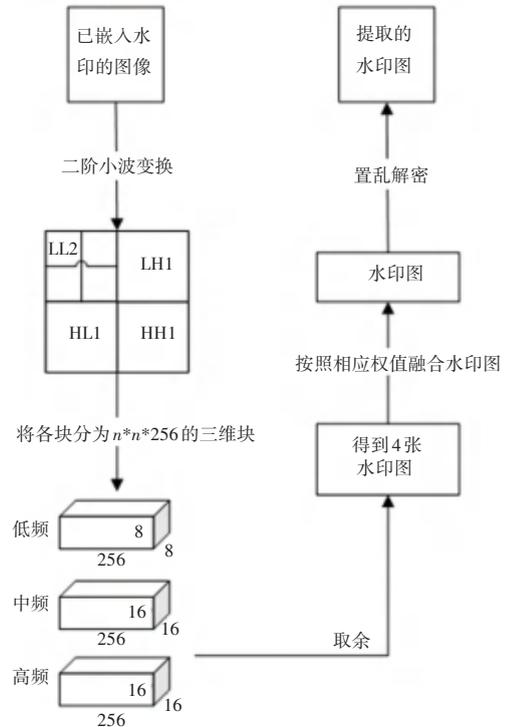


图 4 水印提取过程

Fig. 4 Watermark extraction process

3 实验结果及分析

实验选取 64×64 像素的自制二值水印图像 water, 512×512 像素的宿主图像 lena、barbara、peppers,如图 5 所示。分别对每张图利用 3 种不同

算法嵌入水印,记录嵌入水印前后的峰值信噪比 (PSNR) 值;提取水印时,记录提取水印后的归一化

相关系数(NC) 值。

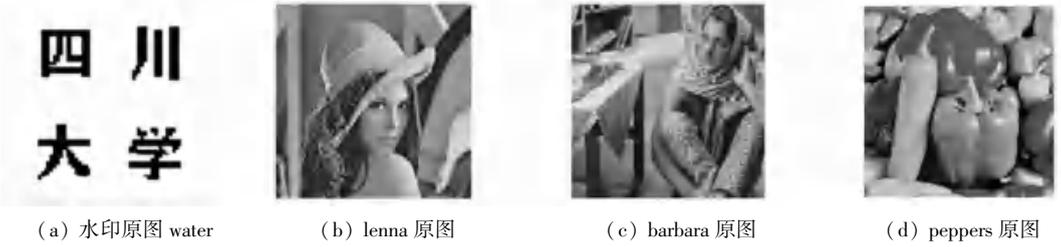


图 5 水印原图以及实验原图

Fig. 5 Original watermarking and experiment

3.1 透明性测试

透明性指水印嵌入后的不可见性,也称为透明性,一般用峰值信噪比 (PSNR) 来衡量,表示宿主图像的失真情况,其单位为 dB(分贝)。通过均方差 (MSE) 进行定义,两个 $m \times n$ 的图像 I 和图像 K ,其均方差定义为公式 (4), PSNR 定义为公式 (5):

$$MSE = \frac{1}{mn} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} \|I(i,j) - K(i,j)\|^2 \quad (4)$$

$$PSNR = 10 \cdot \log_{10} \frac{\max_i I}{MSE} = 20 \cdot \log_{10} \frac{\max_i I}{\sqrt{MSE}} \quad (5)$$

其中, $\max_i I$ 表示图 I 的图像点颜色的最大值,本文中值为 255。

结果表明,利用本文算法嵌入水印后的 3 幅图和 DCT 变换、DWT 变换、Contourlet 变换+SVD(简称 Contourlet 算法) 比较并无太大差异,都满足透明性要求 ($PSNR > 30$ dB),如图 6 所示。分别对嵌入水印后的图进行参数为 0.4 的低通滤波攻击、参数为 0.03 的椒盐噪声攻击、参数为 30 的 JPEG 压缩、参数为 1/4 面积的图像裁剪,如图 7 所示。

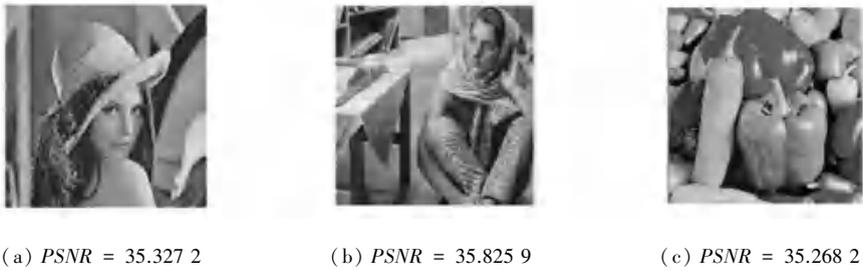


图 6 含水印图

Fig. 6 Image with watermark

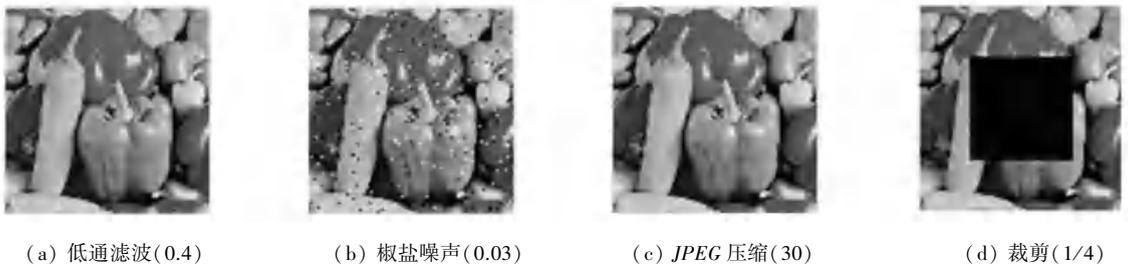


图 7 被攻击后图像

Fig. 7 Image after attack

3.2 鲁棒性测试

鲁棒性一般用归一化相关系数 (NC) 衡量,NC 的值越接近 1,提取的水印与原始水印越相似,NC 的计算公式(6):

$$NC = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (W(i,j) W^*(i,j))}{\sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N W(i,j)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N W^*(i,j)^2}} \quad (6)$$

其中, $W(i, j)$ 表示原水印图像, $W^*(i, j)$ 表示提取出的水印图像。

图7中被攻击图像利用本文算法提取出的水印如图8所示。

实验针对每张测试图, 将本文算法与 DCT 变换, DWT 变换以及 Contourlet 变换作比较, 并分别在

3×3 模板的低通滤波器下(系数分别为 0.4、0.25、0.1)攻击、JPEG 压缩(质量因子分别为 90、60、30)攻击、椒盐噪声(系数分别为 0.03、0.02、0.01)攻击, 以及图像中间 1/4 剪切攻击下对比各种算法的鲁棒性。测试得到的 NC 数值见表 2~表 4。

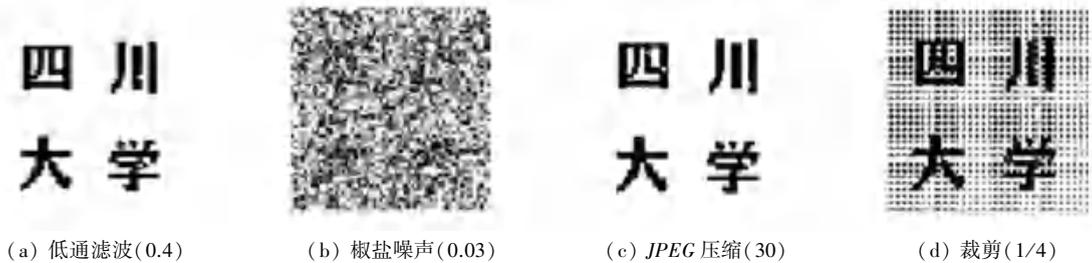


图8 提取水印图

Fig. 8 Watermark extraction

表2 lenna 图提取水印 NC 值

Tab. 2 NC value extraction of watermark from Lenna diagram

攻击类型	参数	DCT	DWT	Contourlet	本文算法
原图	无	1.000	1.000	1.000	1.000
	0.4	NaN	1.000	1.000	0.963
低通滤波	0.25	0.465	1.000	1.000	1.000
	0.1	1.000	1.000	1.000	1.000
	90	NaN	1.000	1.000	1.000
JPEG 压缩	60	NaN	1.000	1.000	0.995
	30	NaN	0.999	0.999	0.996
	0.03	0.058	0.821	0.784	0.885
椒盐噪声	0.02	0.053	0.870	0.842	0.917
	0.01	0.050	0.931	0.923	0.950
裁剪	1/4	0.860	1.000	0.868	0.864

表3 barbara 图提取水印 NC 值

Tab. 3 NC value extraction of watermark from Barbara diagram

攻击类型	参数	DCT	DWT	Contourlet	本文算法
原图	无	1.000	1.000	1.000	1.000
	0.4	NaN	0.986	1.000	0.972
低通滤波	0.25	0.536	1.000	1.000	1.000
	0.1	1.000	1.000	1.000	1.000
	90	NaN	1.000	1.000	1.000
JPEG 压缩	60	NaN	0.985	1.000	0.996
	30	NaN	0.906	1.000	0.995
	0.03	0.030	0.849	0.780	0.886
椒盐噪声	0.02	0.038	0.878	0.838	0.919
	0.01	0.058	0.926	0.915	0.955
裁剪	1/4	0.860	1.000	0.869	0.864

表4 peppers 图提取水印 NC 值

Tab. 4 NC value extraction of watermark from Peppers diagram

攻击类型	参数	DCT	DWT	Contourlet	本文算法
原图	无	1.000	1.000	1.000	1.000
	0.4	NaN	1.000	1.000	0.941
低通滤波	0.25	0.301	1.000	1.000	1.000
	0.1	1.000	1.000	1.000	1.000
	90	NaN	1.000	1.000	1.000
JPEG 压缩	60	NaN	1.000	1.000	0.997
	30	NaN	0.999	0.999	0.999
	0.03	0.033	0.826	0.776	0.858
椒盐噪声	0.02	0.044	0.880	0.845	0.910
	0.01	0.050	0.933	0.923	0.948
裁剪	1/4	0.860	1.000	0.865	0.864

3.3 分析

对比各种算法的鲁棒性, 通过表 2~表 4 得知:

(1) 不同图片对于算法的测试结果基本无影响, 提取水印的 NC 值随攻击强度的变化而变化;

(2) 低通滤波系数越大, JPEG 质量因数越小, 椒盐噪声越大, 都会导致提取水印鲁棒性变差;

(3) DCT 变换算法具有很好的透明性, 但水印鲁棒性差, 稍加攻击就无法提取水印, 另外 3 种算法牺牲了适量透明性(但仍然保持 $PSNR > 30$), 但水印鲁棒性强;

(4) DWT 变换具有良好的透明性, 抗剪切攻击效果优, 但面对椒盐噪声攻击, 和质量因数较低的 JPEG 压缩攻击, 效果不能让人满意;

(5) Contourlet 变换有比较令人满意的透明性和

(下转第 53 页)