

# 基于离散小波—奇异值分解的多水印嵌入算法<sup>①</sup>

吴 捷, 唐红锁

(泰州职业技术学院 信息工程学院, 泰州 225300)

**摘 要:** 为提高传统数字图像水印算法的安全性, 解决数字水印对信号处理和几何失真比较敏感的问题, 提出一种新的以离散小波多级分解与奇异值分解相结合的数字图像水印算法. 不同于常见的基于小波变换的数字水印技术, 该方案在原始图像离散小波变换的低频近似区域和高频对角区域中嵌入水印, 在图像的保真度和鲁棒性之间取得较好的折衷. 水印检测时, 将从低频近似区域和高频对角区域中提取出的水印进行比较, 选择效果较好的水印作为最终检测水印. 实验结果表明, 提出的多水印算法对于各种攻击具有较强的鲁棒性.

**关键词:** 数字水印; 离散小波变换; 奇异值; 多水印; 鲁棒

## Multiple Watermarking Scheme Based on the DWT—SVD

WU Jie, TANG Hong-Suo

(School of Information and Engineering, Taizhou Polytechnic College, Taizhou 225300, China)

**Abstract:** In order to improve the security of traditional digital image watermarking algorithm, and solve the problem of digital watermark is sensitive to signal processing and geometric distortion. A new digital watermarking algorithm combined with singular value decomposition and wavelet transform is proposed. Unlike the common wavelet based watermarking techniques, the proposed scheme lies essentially on marking the approximation and diagonal bands of the discrete wavelet transform (DWT) of the cover image achieving a better compromise between fidelity and robustness. The examination algorithm of watermark used the double watermark comparison examination. Experiments show that our contributions provide the multiple watermarking schemes with robustness to a wide variety of attacks.

**Key words:** digital watermarking; discrete wavelet transform; singular value; multiple watermarking; robustness

随着网络通讯技术的发展以及图像处理工具的普及, 数字媒体产品的安全性面临各种威胁, 保护作者的数字版权刻不容缓, 数字水印技术正是在这样的背景下产生的. 数字水印技术为数字媒体信息安全带来了新的机遇, 其通过嵌入算法将具有特殊作用的水印隐藏在数字媒体信息中, 用于数字媒体信息的版权保护和内容认证.

数字水印方法包括水印的嵌入和提取过程, 根据水印的嵌入位置可以将水印主要划分为空间域数字水印和变换域数字水印. LSB 是之前广泛研究的一类空间域水印算法, 它是通过将秘密信息嵌入到载体图像像素值的最低有效位实现的. 该算法虽然实现简便,

但是水印的鲁棒性较差, 而变换域数字水印是直接信号空间上叠加水印信息, 具有较高的隐蔽性和安全性, 所以近几年的众多研究成果都是基于变换域展开的.

在一系列变换域技术中, 由于小波变换具有良好的时频局部化特性以及与人类视觉系统相符的变换机制, 近年来, 小波变换技术经常被应用到数字水印领域中, 很多学者对基于离散小波变换(DWT)的数字图像水印算法<sup>[1]</sup>进行了卓有成效地研究. 部分学者将离散小波变换和奇异值分解(SVD)技术<sup>[2,3]</sup>结合使用, 取得了较好的实验结果.

文献[4-6]是技术特点比较相似的文章. 其中文献

<sup>①</sup> 基金项目:江苏省自然科学基金(BK20141195)

收稿时间:2014-12-13;收到修改稿时间:2015-01-26

[4]先对原始图像进行一级小波变换,然后对其低频子图运用奇异值分解,在分解后的对角矩阵中加入水印序列.文献[5]对水印图像进行置乱处理并对原始图像进行分块,从中找到符合要求的最佳水印嵌入子块,然后对所选择的最佳子块进行小波变换,对子块的低频系数进行奇异值分解,最后将水印嵌入各块的奇异值中进行仿真.文献[6]和文献[4]的处理方法相似,不同的是对原始图像采用了两级小波变换.文献[7-9]都采用了多水印技术,即将水印嵌入小波变换的多级区域中,提取时通过比较各区域中的水印来确定最终检测水印.文献[7]先对原始图像进行一级小波分解,把水印嵌入两个中频区域中,在提取水印时使用了神经网络的相关技术.文献[8]先对整个图像应用三级离散小波变换,再对得到一个低频区域 LL3 和两个中频区域 LH3 和 HL3 运用奇异值分解,嵌入经过混沌置乱的水印图像.水印检测时,分别提取出三份水印并进行比较,采用效果较好的水印作为检测水印.文献[9]同样是在低频和中频区域嵌入水印,然后由提取出的三份水印生成第四份水印作为最终检测水印.

本文的主要贡献在于,在小波变换后图像的低频和高频子带中嵌入水印.因为文献[10]的研究表明,根据各种类型攻击的实验结果,原始水印和提取水印的最高SR值总是出现在高频或低频子带.和文献[8]、[9]相比,本文算法只需要在两个子带中嵌入水印,而文献[8]、[9]都需要在三个子带中嵌入水印.

## 1 原始水印图像的混沌置乱

### 1.1 混沌序列

在非线形科学中,混沌指的是一种发生在确定性系统中的不规则运动.它不具周期性,不会收敛但有界,且对初始值非常敏感.混沌序列由混沌系统经过量化生成,是一种性能优良的伪随机序列,近年来被广泛应用于保密通信领域.本文主要讨论其中的Logistic映射<sup>[11]</sup>,其定义如下:

$$x_{k+1} = \mu x_k (1 - x_k), \quad x_k \in (0,1), \quad \mu \in (0,4) \quad (1)$$

当  $3.5699456... < \mu \leq 4$  时系统处于混沌状态.在本文提出的算法中,取  $\mu = 4$ .表1是  $\mu = 4$  时的该映射对不同初始值进行迭代后的结果,其中的数据表明该映射对初始值非常敏感.图1是  $\mu = 4$  时该混沌映射的仿真结果,可以看出,Logistic映射处于混沌状态时,其输入和输出均分布在(0,1)上.

表1 Logistic映射迭代结果比较

初始值: $x_0$	0.90000001	0.90000002
迭代次数: 1	0.35999997	0.35999994
2	0.92159996	0.92159993
50	0.10443600	0.21019023

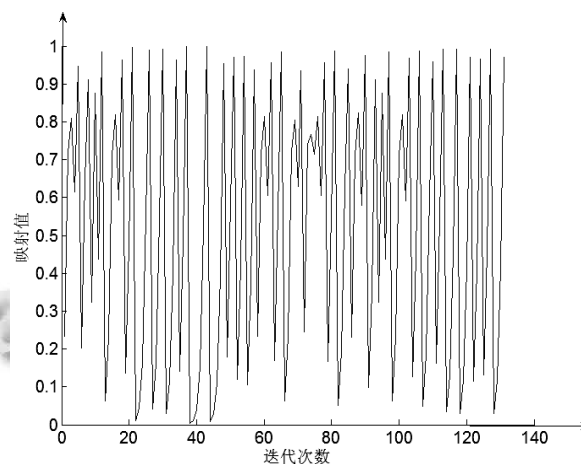


图1 初值为0.2345时Logistic映射迭代仿真曲线

### 1.2 本文的混沌置乱算法

设水印图像的大小为  $W = M \times N$ , 用非线性Logistic混沌映射序列对图像进行置乱.本文的水印置乱方法如下:

(a) 用非线性Logistic混沌映射产生一个长度为  $\{m_1, m_2, \dots, m_{M \times N}\}$  的混沌序列.

(b) 将产生的混沌序列  $\{m_1, m_2, \dots, m_{M \times N}\}$  转换成与水印相同大小的二值矩阵,方法如下:

$$m = \text{mod}(1000 * m, 256);$$

$$m = \text{uint8}(m);$$

$$m = \text{im2bw}(m);$$

(c) 将上面处理得到的混沌二值矩阵和明文水印进行异或操作,得到置乱加密后的水印.

水印图像的加密效果如图2所示.



图2 原始水印图像和置乱后的水印

## 2 图像的小波变换和奇异值分解

### 2.1 图像的小波变换

小波变换是一种新兴的数学分支,具有良好的多

分辨率表示、时频局部分析特性,在信号处理、图像处理、语音处理以及众多非线性科学领域得到广泛地应用.对一幅图像进行一次二维的离散小波变换后,产生四个子带图像:一个近似子带(LL)和三个细节子带——垂直子带(LH)、水平子带(HL)和对角子带(HH),它们分别代表了原始图像的中频和低频信号.而近似子带则代表了原始图像的低频信号,包含了原始图像的最重要信息.可以对 LL 子带进行进一步分解,图像的二级小波分解过程如图 3 所示.

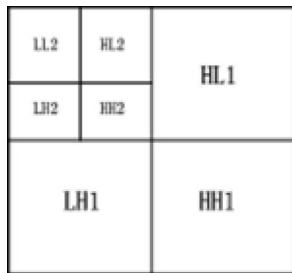


图 3 二级小波分解

## 2.2 图像的奇异值分解

奇异值分解是线性代数中一种广泛研究的正交矩阵分解,在信号处理等领域有着重要的应用.

众所周知,在计算机内可以以矩阵的形式来存储图像,图像中相应坐标的像素值对应于矩阵中的每个元素.我们用  $A \in R^{M \times N}$  来表示一个图像矩阵,其中  $R$  表示实数域,则它的奇异值分解表达式如下:

$$A = USV^T$$

式中,  $U \in R^{M \times M}$ ,  $V \in R^{N \times N}$  均为正交矩阵;

$S \in R^{M \times N}$ , 其非对角线上的元素都为 0, 对角线上的元素  $\sigma_i$  满足:

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_r \geq \sigma_{r+1}$$

其中  $r$  表示矩阵  $A$  的秩, 其值等于非 0 奇异值的个数;  $\sigma_i$  为矩阵  $A$  的奇异值, 用矩阵表示为:

$$S = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \sigma_N \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

将奇异值分解应用于数字水印领域既可以保障加入水印的不可见性,又可以保证加入水印的健壮性.

## 3 水印的嵌入与提取

### 3.1 水印的嵌入

本文的原始图像选择 256 灰度等级 ( $N \times N$ ) 的标准图像  $I$ , 二值水印图像大小为  $\frac{N}{2^n} \times \frac{N}{2^n}$ ,  $n$  是小波分解的级数.

水印的嵌入步骤可总结如下:

(1) 对  $I$  进行  $n$  层离散小波变换(DWT), 得到子带  $LL_n$ 、 $HH_n$  作为嵌入区域;

(2) 对二值水印图像  $W$  进行混沌置乱, 得到置乱后的水印图像  $W'$ ;

(3) 选择  $LL_n$ 、 $HH_n$  和  $W'$ , 对其分别进行奇异值分解, 得到  $[U, S, V] = \text{svd}(LL_n, HH_n)$ ,  $[U_1, W_1, V_1] = \text{svd}(W')$ ;

(4) 运用加性准则:  $Temp = S + \alpha W_1$  (其中  $\alpha$  为嵌入强度因子), 修改子带的奇异值; 需要说明的是, 本文在向  $LL_n$  和  $HH_n$  子带中嵌入水印时, 选择使用不同的  $\alpha$  值, 因为  $LL_n$  和  $HH_n$  子带的数值系数不同;

(5) 对  $Temp$  再进行一次奇异值分解,  $[U_2, S_2, V_2] = \text{svd}(Temp)$ ;

(6) 运用公式:  $CW = U \times S_2 \times V'$ ; 重构含水印图像的  $LL_n$  和  $HH_n$  系数;

(7) 对  $LL_n$  和  $HH_n$  做  $n$  层离散小波逆变换(IDWT), 得到含水印的图像  $I^*$ .

### 3.2 水印的提取

本文算法属于非盲水印算法, 提取水印时需要使用原始图像, 具体步骤如下:

(1) 对待测图像  $I^*$  和原始图像  $I$  分别进行  $n$  层离散小波变换, 得到  $LL_n^*$ 、 $HH_n^*$  和  $LL_n$ 、 $HH_n$ ;

(2) 对  $LL_n^*$ 、 $HH_n^*$  分别进行奇异值分解, 得到  $[U_3, S_3, V_3] = \text{svd}(LL_n^*, HH_n^*)$ , 计算中间矩阵  $S_N = U_2 \times S_3 \times V_2$ ;

(3) 运用公式:  $W_N = (S_N - S) / \alpha$  提取水印(其中  $\alpha$  为嵌入强度), 得到要提取水印的奇异值矩阵;

(4) 运用公式:  $W^* = U_1 \times W_N \times V_1$  重构水印, 之后作混沌逆变换得到水印图像;

(5) 将从  $LL_n^*$  和  $HH_n^*$  中提取出的水印的 NC 值进行比较, 数值大的确定为最终检测水印.

## 4 实验结果与分析

本文的实验环境为 Windows XP 操作系统, 采用

Matlab7.0 工具进行仿真, 原始图像采用 512x512 像素的 Lena、boat、peppers、baboon 标准灰度图像, 水印图像采用 64x64 像素的“苏州大学”字的二值图像. 采用 Haar 正交小波对原始图像进行 3 级小波分解与重构. 采用峰值信噪比 PSNR 作为图像质量的评价标准, 水印检测结果的评价标准采用提取出来的水印和  $W^*$  原始水印  $W$  之间的相似度 NC 进行衡量.

表 2 中给出是未经任何攻击提取出的水印参数, 四种测试图像的 PSNR 值都在 42 以上, 说明本文算法能保证水印的不可见性, 而 NC 值都为 1.0000, 证明本文算法可以正确提取水印.

表 3 中给出了三幅加水印后的测试图像经受各种类型攻击的详细参数. 针对每一种类型的攻击, 本文都从 LL 和 HH 子带中提取了水印(针对同一种攻击, 上面一行是从 LL 中提取水印的 NC 值, 下面一行是从 HH 中提取水印的 NC 值), 并对 NC 值进行了比较. 分析数据后发现, 针对旋转、压缩、滤波等攻击, 从 LL 子带中提取出的水印要明显优于从 HH 子带中提取出的水印. 但在直方图均衡化攻击、图像增强、噪声三种攻击中, 从 HH 中提取出的水印要优于从 LL 中提取出的水印. 图 4 则是针对 lena 图的测试结果, 给出了从 LL 和 HH 中所提取水印的详细 NC 值比较图, 其中横坐标表示表 2 中从上往下依次 9 种攻击, 纵坐标表示 NC 值. 图 5 则给出部分攻击后提取出的水印.

表 4 和表 5 是本文算法和文献[8]、[9]算法的比较. 文献[8]的测试图像使用的是 256x256 的 bard 图像, 水印是 32 x32 的二值图像, 加入水印后图像的 PSNR 值为 41.9689. 为了和文献[8]进行比较, 本文也使用了相同的测试图像以及相似的水印, 本文的 PSNR 值要高于文献[8], 从表 4 中可以看出, 除了高斯模糊攻击外, 其他各项攻击测试结果本文算法均要优于文献[8].

文献[9]的测试载体图像和本文相同, 本文构造了和文献[9]相同的水印进行试验, 文献[9]加入水印后图像的 PSNR 值为 37.266, 低于本文的 42.8427. 从表 5 可以看出, 本文算法在各种攻击下的表现都要优于文献[9].

表 2 不同原始图像的相似度 NC 和 PSNR

原始图像	相似度 NC	PSNR/dB
lena	1.0000	42.8288
boat	1.0000	42.8441
peppers	1.0000	42.8753
baboon	1.0000	42.8286

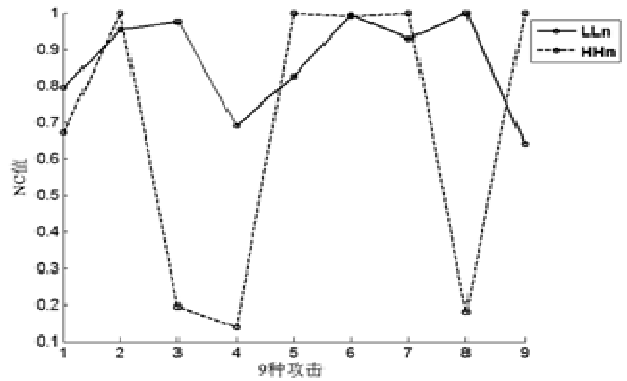


图 4 9 种攻击下 LLn 和 HHn 中提取水印的 NC 值



(a)原始图像与原始水印 (b)逆时针旋转 50 后的含水印图像与提取出的水印



(c)15%的 JPEG 压缩后含水印 (d)5%的 JPEG 压缩后含图像与提取出的水印 水印图像与提取出的水印



(e)加入密度为 0.3 的椒盐噪声 (f)直方图均衡化攻击后的含水印图像与提取出的水印 含水印图像与提取出的水印



(g)[5 5]中值滤波后的含水印 (h)加入密度为 0.03 的高斯图像与提取出的水印 噪声含水印图像与提取出的水印

图 5 水印算法结果

表 3 水印图像攻击测试结果比较

攻击方式	lena		boat		peppers	
	PSNR	NC	PSNR	NC	PSNR	NC
旋转 5°	14.5562	0.7942 0.6709	13.7194	0.8653 0.6081	13.4267	0.6893 0.5993
直方图均衡化攻击	19.1807	0.9533 1.0000	17.3449	0.9588 1.0000	18.5626	0.7050 1.0000
中值滤波 [5 5]	31.0683	0.9736 0.1935	27.8968	0.8967 0.0122	31.9760	0.9787 0.2251
中心裁剪 1/16	17.3960	0.6904 0.1391	18.7904	0.7022 0.6777	16.9107	0.7092 0.5946
高斯噪声 [0 0.03]	15.5883	0.8249 1.0000	15.6755	0.8324 1.0000	15.8293	0.5462 1.0000
JPEG 15% 压缩比	31.5890	0.9951 0.9911	30.1118	0.9936 0.9906	31.2624	0.9948 0.9925
椒盐噪声 (0.02)	22.3348	0.9281 0.9982	22.3275	0.9525 0.9988	22.1555	0.8507 1.0000
高斯低通滤波	33.1661	1.0000 0.1807	31.0019	1.0000 0.0393	32.7445	0.9998 0.2561
图像增强 [0,0.8],[0,1]	17.4495	0.6407 1.0000	16.5628	0.6404 1.0000	18.2723	0.6572 1.0000

表 4 本文算法与文献[8]算法的比较

攻击类型	本文算法	文献[8]算法
JPEG 压缩(压缩因子 30)	1.0000	0.9817
JPEG 压缩(压缩因子 5)	0.9571	0.9273
高斯模糊(5×5)	0.7191	0.8960
高斯噪声(0.3)	1.0000	0.8735
中值滤波(3×3)	0.9976	0.8644
剪切 5%(中心)	0.6721	0.5982
旋转 5°	0.7882	0.6733

表 5 本文算法与文献[9]算法的比较

攻击类型	本文算法	文献[9]算法
JPEG 压缩(压缩因子 50)	1.0000	1.0000
JPEG 压缩(压缩因子 30)	1.0000	0.9862
JPEG 压缩(压缩因子 15)	0.9951	0.9273
高斯噪声(0.01)	1.0000	0.9282
椒盐噪声(0.02)	0.9982	0.9307
剪切 10%(右下角)	0.9398	0.8983
中值滤波(3×3)	1.0000	0.9903

## 5 结语

本文基于 DWT 和 SVD, 提出了一种新的数字水印算法. 和之前算法不同的是, 本文在图像 3 级离散小波变换的低频区域和高频区域中嵌入混沌水印信息, 在保证水印不可见的前提下, 提高了嵌入水印的信息量. 水印检测时, 通过比较从 LL、HH 两个子带中提取出水印的 NC 值来确定最终检测水印. 实验结果表明修改 LL 和 HH 子带嵌入水印可以取得较好的保真度和鲁棒性. 与其他一些在低频和中频子带嵌入水印的算法相比, 本文方法具有更好的稳健性和可靠性.

## 参考文献

- Anusudha K, Sangeetha A, Ayeswarya S. A robust digital watermarking of satellite image at third level DWT decomposition. Proc. of International Conference On Computational Intelligence and Multimedia Applications. 2007. 78–82.
- 刘瑞桢, 谭铁牛. 基于奇异值分解的数字图像水印方法. 电子学报, 2001, 29(2): 168–171.
- 周波, 陈健. 基于奇异值分解的、抗几何失真的数字水印算法. 中国图像图形学报, 2004, 9(4): 507–512.
- 张仁昌, 耿国华. 基于奇异值分解和小波变换的抗几何失真数字水印新方法. 计算机应用与软件, 2007, 24(6): 78–81.
- 陈宏, 胡宁静. SVD 和 DWT 数字水印算法的应用研究. 计算机仿真, 2011, 28(4): 295–298.
- 雷雷, 郭树旭, 王雷. 基于小波变换的 SVD 数字图像水印算法研究. 计算机仿真, 2013, 30(9): 169–172.
- 陈军, 张伟, 扬华千, 等. 一种基于小波变换和神经网络的数字水印算法. 计算机科学, 2011, 38(6): 142–144.
- 张秋余, 李凯, 袁占亭. 基于混沌和 SVD—DWT 的稳健数字图像水印算法. 计算机应用研究, 2010, 27(2): 718–720.
- 薛胜男, 陈秀宏. 基于混沌加密和 SVD 的数字图像水印算法. 计算机工程, 2012, 38(19): 107–110.
- Tao P, Eskicioglu AM. A robust multiple watermarking scheme in the discrete wavelet transform domain. Proc. of SPIE. 2004. 133–144.
- 王伟. 基于 Logistic 映射和 Chebyshev 映射的快速图像加密算法研究[硕士学位论文]. 南京: 南京邮电大学, 2009.