

基于 DWT-SVD 的图像盲水印研究

陶锋

(广州大学 华软软件学院, 广东 广州 510990)

摘要: 提出了一种新的基于离散小波变换(DWT)与奇异值分解(SVD)相结合的数字图像水印算法。该算法将原始图像作小波分解并将小波分解得到的低频子带进行分块,对每一块进行奇异值分解后,选取每块中最大的奇异值通过量化的方法嵌入经过 Arnold 置乱后水印信息。水印的提取不需要原始图像,但受到密钥的限制,不知道密钥的人无法正确地恢复数字水印。实验结果表明,该算法具有较好的不可感知性、鲁棒性和安全性。

关键词: 离散小波变换; 奇异值分解; 盲水印; 图像置乱; 鲁棒性

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A

Research of image blind watermarking based on DWT-SVD

TAO Feng

(South China Institute of Software Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510990, China)

Abstract: In this paper, a new watermarking algorithm based on discrete wavelet transform (DWT) of image and singular value decomposition (SVD) is presented. After decomposing the original image into four bands, the SVD is applied to the blocks of the low sub-band. To improve the security the watermark is scrambled by Arnold transform, and then is embedded into the largest singular value of every block. The watermark can be extracted without original image, among which a person who does not know the secret key cannot correctly retrieve the watermark. Experimental results indicate that the performance of the proposed watermarking algorithm is invisible, robust and secure.

Key words: DWT; SVD; blind watermarking; image scrambling; robustness

随着计算机网络的迅速发展和广泛应用,数字媒体的非法篡改、复制和盗版现象也越来越普遍,数字媒体的版权保护已成为迫切需要解决的问题。作为信息隐藏领域中的数字水印技术是实现多媒体版权保护与信息完整性保证的有效方法。它的基本思想是在数字图像、音频和视频等产品中嵌入秘密的水印信息以便保护数字产品的版权。对于数字水印技术,一般要求水印系统具有不可见性、鲁棒性和安全性。也就是说,水印必须是不可察、不可测和难于破坏的。

目前,从实现角度看水印算法主要分为空域和变换域算法两大类。空域算法是直接对空域数据进行操作,变换域算法是在变换域中进行水印的嵌入与提取,如离散傅里叶变换(DFT)、离散余弦变换(DCT)和离散小波变换(DWT)^[1]等。与空域相比,变换域算法具有更好的鲁棒性。由于离散小波变换具有良好的多分辨率表示、

时频局部分析特性,基于 DWT 变换域的数字图像水印算法的研究更是得到了普遍的关注。

按水印的提取方法划分,水印算法又可分为提取时需要原图像和不需要原图像两种。前者称为非盲水印,后者称为盲水印。非盲水印算法在提取过程中需要原始图像,在版权认证的应用中,意味着需要大量的存储资源和计算资源,如果需要认证的数字作品数量很多,给定一个数字作品要去查找相应的原作品本身就很难。近几年来学术界研究的数字水印算法大多数属于盲水印算法。

本文提出的水印算法是一种新的基于小波变换(DWT)和奇异值分解(SVD)相结合的盲水印算法。这样可以充分利用 DWT 的多分辨率特性和 SVD 所固有的特征,增强了水印的不可见性和鲁棒性。在水印提取过程中不需要原始图像,但受到密钥的限制,提高了安全性。

以下将详细介绍本算法的原理以及水印嵌入、提取的过程和实验结果。

1 基于 DWT-SVD 的水印算法

1.1 图像置乱

所谓“图像置乱”，可以表示为 $R:U \rightarrow U, U \subset R^2$ 。其中， R 表示映射， R^2 表示二维空间，即图像置乱是二维空间的一个映射。任何具有可逆特性的映射都可用于图像置乱。置乱的作用是改变原图像的排列组合方式及空间相关性。用得较多的置乱技术是基于 Arnold 变换、幻方变换、分形 Hilbert 曲线、IFS 模型、Conway 游戏和 Gray 码变换等方法。

Arnold 变换是 Arnold 在研究环面上的自同态时提出的，后来被应用到数字图像上。从采样原理分析，数字图像可看作是在二维连续的曲面上，按照某一间隔和某种策略进行采样所得到的一个二维离散点的阵列，即一个图像矩阵。对于一幅大小为 $N \times N$ 的图像 A ，用公式(1)进行 Arnold 变换：

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ k & k+1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \pmod{N} \quad (1)$$

$$(x, y \in \{0, 1, 2, \dots, N-1\})$$

式中， (x, y) 是原图像的像素点， (x', y') 是变换后新图像的像素点， N 是图像阶数即图像的大小，一般考虑正方形图像， k 是属于 $[1, N]$ 的一个整数。记变换矩阵为 A ，由此，做迭代程序：

$$I_{xy}^{n+1} = A I_{xy}^n \pmod{N}, I_{xy}^n = (x, y), n = 0, 1, 2, \dots \quad (2)$$

式中， n 代表迭代次数，整个迭代过程呈周期性，即当此图像经过一定周期的迭代后会重现原图像。由此，可见，Arnold 变换算法简单直观且具有周期性，因此，本文选取 Arnold 变换对水印图像进行预处理，其置乱次数及 k 可作为隐藏系统的密钥，从而提高了系统的安全性和保密性。

1.2 图像的小波变换

小波变换是近几年兴起的一个崭新的信息分析理论，是一种新的可达到时域或频域局部化的时-频域分析方法，具有多分辨率分析的特点。利用小波变换可以提高水印在视觉上的隐藏性和稳健性。图 1 是一个小波一级分解示意图，通过一级小波变换，原始图像被分解为 4 个一级子图，即 1 个低频子带图像 LL 和 3 个高频子图：水平细节子带图像 HL、垂直细节子带图像 LH、对角细节子带图像 HH。其中 LL 集中了图像的大部分能量，可以继续分解。

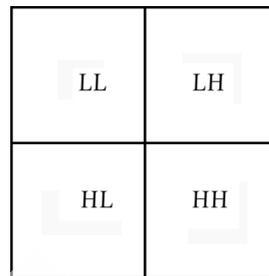


图 1 图像一级小波分解结构图

1.3 SVD 特性分析

数值分析中的奇异值分解(SVD)是一种将矩阵对角化的数值算法^[2]。从线性代数的角度，一幅灰度图像可以被看成是一个非负矩阵。若一幅图像用 A 表示定义为 $A \in R^M \times N$ ，其中， R 表示实数域，不失一般性，假设 $M < N$ 。则矩阵 A 的奇异值分解定义如下^[3]：

$$A = U \Sigma V^T \quad (3)$$

式中， $U \in R^M \times M$ 及 $V \in R^N \times N$ 都是正交矩阵， Σ 是一个对角矩阵，其对角线上的元素满足：

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 \geq \dots \geq \sigma_M \geq 0 \quad (4)$$

σ_i 是由该分解所唯一决定的，叫做 A 的奇异值，它也是 AA^T 的特征值的平方根。分解式 $U \Sigma V^T$ 称作 A 的奇异值分解。奇异值分解具有如下 3 个显著特性：(1) 奇异值所表现的是图像的内蕴特性；(2) 图像奇异值的稳定性非常好，在图像被施加小的扰动时，其奇异值不会有大的变化；(3) 在对图像做奇异值分解所得的奇异值序列 σ_i 中，第一个奇异值比其他奇异值大得多^[4]。

从数字水印的角度，在奇异值中嵌入水印，利用图像奇异值的第 1 个特性使得水印嵌入算法具有很好的不可见性；第 2 个特性确保水印具有很好的鲁棒性；第 3 个特性为选择奇异值的方法提供了依据，因为块奇异值分解会产生更多具有较大数值的奇异值，这对水印嵌入是有利的，所以本文采用块奇异值分解。

1.4 水印的嵌入

设 I 为载体图像， W 为水印图像。

(1) 利用公式(1)和(2)对水印图像 W 进行 Arnold 置乱变换后得到 W' ，其中 k 和置乱次数可以作为密钥。

(2) 对载体图像 I (大小为 $M \times N$) 进行一级小波分解，得到 3 个高频子带 HH、LH、HL 和 1 个低频子带 LL；将低频子带图像按 $m \times n$ 分块，则低频子带图像所能嵌入水印的最大 bits 数为： $\text{round}(M/2m) \times \text{round}(N/2n)$ ，即如果水印的像素点数超过了该值，则无法嵌入该水印，或者必须先对水印进行尺度变换，减少信息量。

(3) 对每一块进行奇异值分解(SVD)， $Block_i = U_i \Sigma_i V_i^T$ 并让 Σ_i 中的奇异值 σ_i 按降序排列。

(4) 对每块中的第 1 个值 σ_1 按以下规则进行修改(令

$Z = \sigma_i \bmod q$:

① if $W_{(i,j)}' = 1$, 则:

$$\begin{cases} \sigma_1' = \sigma_1 - Z - q/4 & \text{if } Z < q/4 \\ \sigma_1' = \sigma_1 - Z + 3q/4 & \text{else} \end{cases} \quad (5)$$

② if $W_{(i,j)}' \neq 1$, 则:

$$\begin{cases} \sigma_1' = \sigma_1 - Z + q/4 & \text{if } Z < 3q/4 \\ \sigma_1' = \sigma_1 - Z + 5q/4 & \text{else} \end{cases} \quad (6)$$

式中, q 为嵌入强度因子, $W_{(i,j)}'$ 为相应块所嵌入置乱后的水印信息, 嵌入水印后的块 $Block_i' = U_i \Sigma_i' V_i^T$ 。

(5) 重复(3)、(4)直至嵌入所有的水印信息, 再进行小波的逆变换即可得到水印后的图像。

1.5 水印的提取

水印提取是水印嵌入的逆过程, 该算法最大的优点是提取水印不需要原始图像。其提取过程如下:

(1) 将待检测图像进行一级小波分解, 将得到的低频子带图像按 $m \times n$ 分块。

(2) 对每一块进行奇异值分解(SVD), $Block_i' = U_i \Sigma_i' V_i^T$, 并让 Σ_i' 中的奇异值 σ_i' 按降序排列。

(3) 按以下规则对 σ_i' 进行修改(令 $Z = \sigma_i' \bmod q$):

$$\begin{cases} W_{(i,j)}' = 1 & \text{if } Z > q/2 \\ W_{(i,j)}' = 0 & \text{else} \end{cases} \quad (7)$$

(4) 重复(2)、(3)直到所有低频子带的块嵌入的水印信息都得到提取。

(5) 将提取出的 W' 通过保存的密钥进行 Arnold 的逆变换, 即可获得原始水印信息 W 。

2 实验结果

为了检验本算法水印的鲁棒性和不可见性, 本文采用 2 个常用指标值来进行度量。

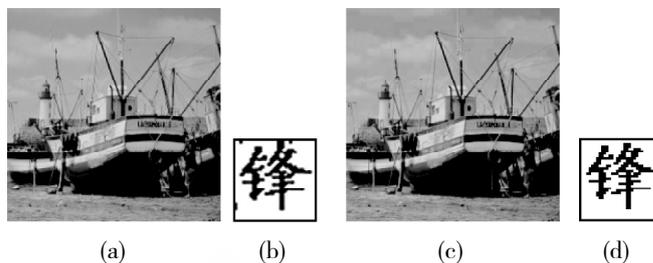
(1) 归一化相似度 NC , 度量所提取的水印与原始水印的相似程度, NC 定义为:

$$NC = \frac{\sum_{i,j} x_{i,j} x'_{i,j}}{\sum_{i,j} x_{i,j}^2} \quad (8)$$

(2) 峰值信噪比 $PSNR$, 度量隐秘载体图像与原始图像之间的质量差别, $PSNR$ 定义为:

$$PSNR = 10 \lg \left(\frac{IJ \max_{i,j} I_{i,j}^2}{\sum_{i,j} (I_{i,j} - I'_{i,j})^2} \right) \quad (9)$$

实验平台为 Matlab6.5 仿真平台, 原始载体图像为标准灰度图像 Boat(512 × 512 × 8)、水印为 32 × 32 像素的二值图像如图 2 所示。本文采用 haar 小波基, 将载体图像 Boat 一层小波分解后, 将低频子带图像系数分成 1024 个 8 × 8 大小的块。为了实验的视觉效果, LL 频带选取的嵌入强度因子 $q=130$, 密钥的值取 $k=158$, 迭代次数 $n=13$ 。



注: (a)原始图像; (b)原始水印; (c)嵌入水印的图像 ($PSNR=40.50\text{dB}$); (d)提取出的水印($NC=0.995$)

图2 水印嵌入实验

为了显示提出算法的鲁棒性, 本文对图 2(c)的水印图像采取了 JPEG 压缩、噪声攻击、中值滤波、扭曲和裁减等攻击, 并与一些典型的水印算法进行了比较。

(1) JPEG 压缩

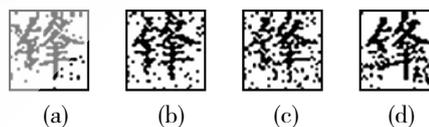
对图 2(c)在 100% ~ 20% 的范围内进行压缩时, 提出的水印清晰可见, NC 值都在 0.98 以上, 当压缩因子为 15% 时提取出的水印如图 3(a)所示。这时, 图像文件大小已由原来 258Kb 压缩到 11Kb, 而提取的水印质量却仍很好, 可见水印对 JPEG 压缩具有很好的鲁棒性。

(2) 增加噪声

对图 2(c)增加方差为 0.005 的高斯噪声和密度为 0.012 的椒盐噪声后, 提取出的水印分别如图 3(b)和图 3(c)所示。

(3) 中值滤波

对图 2(c)连续 5 次实施窗口为 3 × 3 的中值滤波处理, 提取出的水印仍可分辨, 提取出的水印如图 3(d)所示。

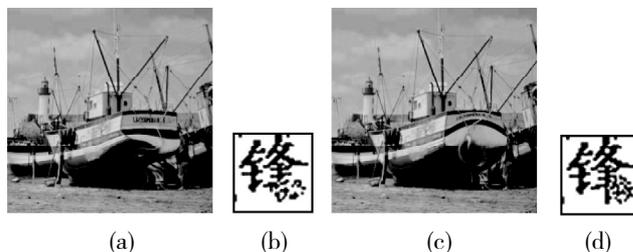


注: (a)压缩 15% 后提取的水印($NC=0.946\ 5$); (b)高斯噪声后提取的水印($NC=0.935\ 7$); (c)椒盐噪声后提取的水印($NC=0.908\ 0$); (d)5 次中值滤波后提取的水印($NC=0.925\ 4$)

图3 对图 2(c)采取攻击后的图像

(4) 几何扭曲

对图 2(c)用 photoshop 工具进行扭曲攻击, 载体图像和提取出的水印如图 4 所示。



注: (a)和(c)分别为扭曲后的载体图像; (b)和(d)为提取出的水印

图4 对图 2(c)采取扭曲攻击后的图像及提取的水印

(5) 图像裁减

对图 2(c)进行不同部位的任意裁减, 载体图像和提取出的水印如图 5 所示。



(a) 裁减后的载体图像



(b) 提取的水印

图 5 对图 2(c)进行不同部位的任意裁剪后的图像

(6) 模糊和锐化攻击

对图 2(c)分别进行模糊和锐化处理, 载体图像和提取出的水印如图 6 所示。



(a)



(b)



(c)



(d)

注: (b)和(d)分别为模糊后的载体图像(a)和锐化后的载体图像(c)中提取的水印

图 6 对图 2(c)进行模糊和锐化攻击后的图像

(7) 算法比较

图像水印的攻击测试方法有很多, 上述攻击测试的结果已经可以证明本文提出的算法具有很好的鲁棒性。为了突出这种算法的性能, 本文将其与几种相关的典型算法进行了类比, 其结果如表 1 所示。虽然参考文献[2]也是使用了 SVD 分解的盲水印算法, 但通过攻击测试, 不难发现本文提出的算法鲁棒性更好。选用标准 $512 \times 512 \times 8$ 灰度图像 Lena 和 Peppers 进行对比实验, 其结果如表 2 所示。

表 1 本文与其他算法的类比

算 法	参考文献[5]	参考文献[2]	本文算法
原始图像大小	512×512	200×200	512×512
水印图像大小	16×16	50×50	32×32
嵌入域	SVD	SVD	DWT-SVD
提取算法	盲水印	非盲水印	盲水印
PSNR/dB	37.89	39.97	40.50
NC	0.993	0.999	0.995
安全机制	未采取	未采取	Arnold变换

表 2 不同攻击下载体图像的 PSNR/dB 和水印的 NC

算 法	图 像	PSNR	未攻击	缩小一半再恢复	3×3中值滤波	JPEG 压缩 15%	裁减左半幅图像	裁减上半幅图像
本文算法	Lena	40.54	0.996	0.846	0.981	0.961	0.671	0.731
	Peppers	40.09	0.976	0.858	0.970	0.944	0.683	0.708
参考文献[5]	Lena	37.89	0.993	0.400	0.583	0.416	0.393	0.490
	Peppers	34.66	0.993	0.446	0.467	0.482	0.686	0.738

本文提出了一种在小波变换域的低频子图中基于块奇异值分解的量化水印算法, 这种基于 DWT-SVD 的水印技术充分结合了小波变换的多分辨率、时频局部的特点和奇异值的 3 个特性, 具有如下特点:

(1) 水印是一幅人眼可识别的有意义的二值图像, 增加了水印的可证明性。

(2) 通过 Arnold 置乱后的水印嵌入增加了水印的安全性。

(3) 基于块奇异值分解的量化水印算法充分利用了奇异值的 3 个特性, 保证了水印的不可见性; 水印嵌入的位置选择小波变换的低频域, 并选择块奇异值中的最大值进行嵌入增强了算法的鲁棒性。

(4) 该算法是盲水印算法, 提取水印不需原始图像, 算法复杂度低。

实验结果表明, 此方法鲁棒性和不可见性好, 简单易实现, 能抗各种图像处理攻击, 是一种行之有效的图像鉴定方法。

参考文献

- [1] JIN Cong, TAO Feng, FU Yu. Image watermarking based HVS characteristic of wavelet transform. International Conference on Intelligent Information Hiding and Multimedia signal Processing, Pasadena, California, USA IEE Computer Society 18.20 December 2006: 71-74.
- [2] 周波, 陈健. 基于奇异值分解的、抗几何失真的数字水印算法[J]. 中国图像图形学报, 2004, 9(4):507-512.
- [3] GASS S I, RAPCSAK T. Singular value decomposition in AHP [J]. European Journal of Operational Research, 2004, 154(3):573-584.
- [4] 刘瑞桢, 谭铁牛. 基于奇异值分解的数字图像水印方法[J]. 电子学报, 2001, 29(2):168-171.
- [5] 胡志刚, 谢萍, 张宪民. 一种基于奇异值分解的数字水印算法[J]. 计算机工程, 2003, 29(17):162-164.

(收稿日期: 2008-12-10)