

基于分块 SVD 自适应数字水印算法

赵 敏, 王慧琴, 卢 麟

(西安建筑科技大学 信息与控制工程学院, 陕西 西安 710055)

摘 要:为解决基于 SVD(singular value decomposition)的水印算法中调节因子单一性问题,提出一种频域率分块 SVD 的自适应数字水印算法。该算法在小波域进行载体图像分块,根据载体图像块自身亮度与纹理特性计算其均值、方差及信息熵等特征值,通过采用“类划分”思想自适应地确定各图像块最佳调节因子。仿真结果表明,该算法有效地克服了传统奇异值分解水印算法中存在的块效应问题,具有很好的透明性,而且对 JPEG 压缩、滤波、加噪等常见的图像攻击具有很强的鲁棒性,其整体性能明显优于同类的水印算法。

关键词:数字水印; 离散小波变换; 奇异值分解; 置乱处理; 自适应

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7024(2011)04-1260-04

Adaptive digital watermarking algorithm based on blocking and SVD

ZHAO Min, WANG Hui-qin, LU Lin

(Institute of Information and Control, Xi'an University of Architectural and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: To solve the single watermark intensity problem of traditional watermarking algorithm based on SVD (singular value decomposition), an adaptive digital watermarking algorithm based on blocking-SVD is proposed. The primitive image is divided into blocks in the DWT domain, eigenvalues based on the mean, variance and information entropy are calculated according to the wavelet block's brightness and texture features, then the "class selection" method is used to select optimal watermark intensity of every image blocks. Experimental results show that the proposed algorithm gets over the Blocking Effect problem of traditional algorithm, and has a good transparency and robustness against attacks, such as JPEG compression, filtering, adding noise and other image processing. The method's performance is much better than the existing and similar watermark algorithms.

Key words: digital watermark; DWT; SVD; scrambling; adaptability

0 引 言

数字水印技术因其在版权保护和内容认证等方面的重要应用价值,已成为信号处理领域最热门研究课题之一。由于 SVD 具有较强的稳定特性,使得基于 SVD 的数字水印算法倍受关注。大多数传统 SVD 算法通常使用同一水印调节因子完成整个嵌入过程。但是,对于不同特征的载体图像,调节因子选择过大会导致图像块效应,过小则直接影响到整个算法的抗攻击性。

基于上述问题,本文利用图像自身的亮度与纹理特性确定最佳调节因子,解决了水印图像的块效应问题,增强了算法的鲁棒性与水印的不可见性。同时,算法利用 SVD 强稳定特性,提出了对二值水印图像进行小波域奇异值分解的思想,将水印奇异值选择性地嵌入到图像子块奇异值中,保证水印信息安全性的同时,提高了水印的抗几何攻击能力。

1 奇异值分解理论

奇异值分解是一种矩阵对角化的数值算法。若把数字图像 A 看成是 $m \times n$ 的非负矩阵,它的秩为 N,则存在 m 阶正交矩阵 U 和 n 阶正交矩阵 V,可将 A 的奇异值分解^[6]为

$$A = USV^T = U \begin{bmatrix} \sum & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} V^T = \sum_{i=1}^N A_i = \sum_{i=1}^N \sigma_i u_i v_i^T \quad (1)$$

式中 S——对角矩阵,对角线上的元素是矩阵 A 的奇异值。U、V—— $m \times m$ 和 $n \times n$ 的正交矩阵,U 和 V 的每列分别称为 A 的左奇异向量和右奇异向量。 u_i, v_i ——U 和 V 的列矢量,其对角线元素 σ_i 表示矩阵 A 的奇异值。

对于图像而言,奇异值分解具有强稳定性。图像奇异值体现了图像的内蕴特性,当图像发生较小的变化时,图像的奇异值不会有大的变化,图像的视觉效果不会受到影响,同时旋转、缩放、平移等几何失真不会改变图像的奇异值。利用图像

收稿日期:2010-06-01;修订日期:2010-08-02。

基金项目:陕西省教育厅专项基金项目(08JK319)。

作者简介:赵敏(1986-),女,陕西西安人,硕士研究生,研究方向为数字图像处理与数字水印技术;王慧琴(1970-),女,山西长治人,博士后,教授,研究方向为网络安全、图像处理、数字水印、智能控制理论与方法等;卢麟(1985-),男,湖南娄底人,硕士研究生,研究方向为大型数据库中知识发现方法。E-mail:zhaomin2161001@163.com

奇异值嵌入水印信息,可以减少图像像素值变化所带来的视觉失真,提高了水印鲁棒性和透明性。

2 人眼视觉特性

人是欣赏图像的主体,图像的品质高低、失真大小都应该首先考虑人眼的感觉。因此向图像中添加水印后,若要保持水印具有较好的不可见性和较强的鲁棒性,通常需要考虑人眼的视觉特征(HVS)。即在保证水印不可见性的前提下,利用人眼的视觉特征,将水印信息进行合理分布,使水印具有较大的容量,同时有更强的鲁棒性,能够抵抗更多类型的攻击。目前使用较多的水印算法是基于 DCT、DWT 等变换的频域算法。图 1 为一典型的利用视觉调节的变换域水印嵌入流程图,即利用视觉调节因子作为嵌入强度,在某一变换域中嵌入水印信息。

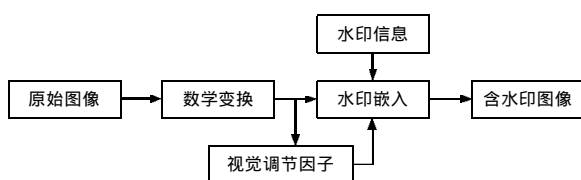


图 1 基于视觉调节的变换域水印嵌入流程

HVS 的主要特性^[2]包括:

(1) 频率敏感性:从变换域的角度来看,对图像进行变换后,变换系数分为高频和低频部分。其中高频部分对应于纹理和边缘区域,而低频部分对应于平滑区域。实验^[1]表明人眼对高频部分加入的噪声有较小的敏感性。

(2) 亮度敏感性:对于图像中的一个区域来说,若平均亮度越大,则其掩蔽性越强。亮度平均值低的区域,对亮度值的较小修改也会引起图像可感知的失真,因此水印应该尽量加在平均亮度值较大的图像区域。

(3) 边缘及纹理掩蔽特性:图像边缘部分的信息对图像的意义较大,边缘的像素亮度、像素位置的改变往往会引起视觉上较大的失真,因此水印的嵌入应该避免影响到图像边缘区域。

3 图像块水印调节因子的计算

调节因子存在着一个界限值。若低于界限值,人类视觉系统就无法感受到水印信号的存在,从而也就实现了不可见性,但过低的界限值会直接水印的鲁棒性;若高于此值,鲁棒性增强,但图像就会出现失真^[6]。对于不同的图像块,相应的界限值也不同。而界限值的选定受到图像本身特性(如背景纹理复杂度或亮度)等因素影响。为了使水印不可见性与鲁棒性之间达到最佳平衡,本文对载体图像的低频带小波系数进行合理分块,根据图像块本身亮度、纹理及边缘特性计算特征值并进行分类,根据分类结果选择调节因子,从而实现自适应的嵌入水印。

3.1 计算步骤

先对预处理图像系数划分为 $L \times L$ 大小,且互不相交的子块。其次,考虑如下视觉特性:

(1) 图像背景亮度的大小直接影响对噪声的敏感程度。图像背景亮度很小或很大时,对噪声表现不敏感状态。

(2) 图像纹理与水印嵌入能量有着直接的关系。图像纹理越强,水印的可见门限越高,允许嵌入的水印能量越大。此外,图像平滑区对噪声敏感,纹理区对噪声不敏感。

我们对每一块进行亮度划分,设整个子带的小波系数均值为 A ,如果子块系数均值大于或等于 A ,该块为亮子块,否则,该块为暗子块。

最后,计算每一子块的熵值和方差,熵值较小的块应该是平滑区域,而熵值较大的区域应是纹理或边缘,纹理对应的方差较小,边缘对应的方差较大。相关计算公式如下:

图像块亮度计算

$$A = \frac{1}{L \times L} \sum_{M(i,j)} f_{ij} \quad (2)$$

图像块纹理计算

$$T = \sum_{M(i,j)} |f_{ij} - A| \quad (3)$$

熵值的计算

$$E = - \sum_{M(i,j)} p_{ij} \log p_{ij} \quad (4)$$

式中 $p_{ij} = f_{ij} / \sum_{M(i,j)} f_{ij}$, f_{ij} 表示像素 (i,j) 的灰度值。

3.2 子块分类

根据计算将所有的图像块分成 4 类:

第 1 类亮度较低,且纹理简单,人类视觉系统对其中像素值的改变较敏感,叠加的水印强度应最小;

第 2 类亮度较高,纹理复杂,且是边缘,叠加的水印强度应较小;

第 3 类亮度较高,纹理复杂,且不是边缘,HVS 对其中像素值的改变敏感性最弱,叠加的水印强度应最大;

其余为第 4 类。

设不同类的子块选择嵌入调节因子为 b ,经仿真实验, b 取下面的值较好

$$b = \begin{cases} 8 & \text{第 1 类} \\ 10 & \text{第 2 类} \\ 13 & \text{第 3 类} \\ 12 & \text{第 4 类} \end{cases}$$

3.3 算法仿真示例

以 256×256 大小的“lena”灰度图像为例,计算步骤如下:

步骤 1 对载体图像进行互不重叠的 8×8 分块。

步骤 2 根据式(2)-(4)计算图像分块后各块特征值。

步骤 3 根据计算结果确定该块所属类。

步骤 4 选取各块最佳调节因子,完成水印嵌入。

仿真结果如图 2 所示。

4 基于分块 SVD 自适应数字水印算法

4.1 算法的基本思想

大量实验证明^[5-8],小波分解后低频分量是对原图像的近似,选择低频区域嵌入水印更有利于提高水印的鲁棒性。因此本文首先对载体图像进行两级小波分解,取出载体图像的低频子带分块,逐块进行 SVD;其次,结合奇异值分解强稳定性,对一级小波分解后水印低频子带 SVD;最后,考虑到人眼对低中频灰度最为敏感^[4]的视觉模型理论,将水印奇异值嵌入到图像块的中频奇异值中。

算法框图如图 3 所示。

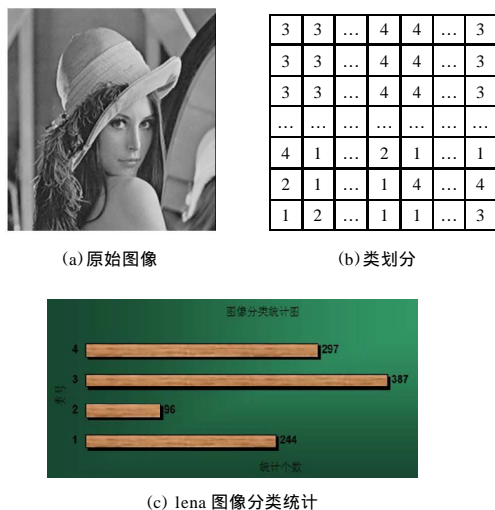


图2 图像块水印调节因子的计算结果示例

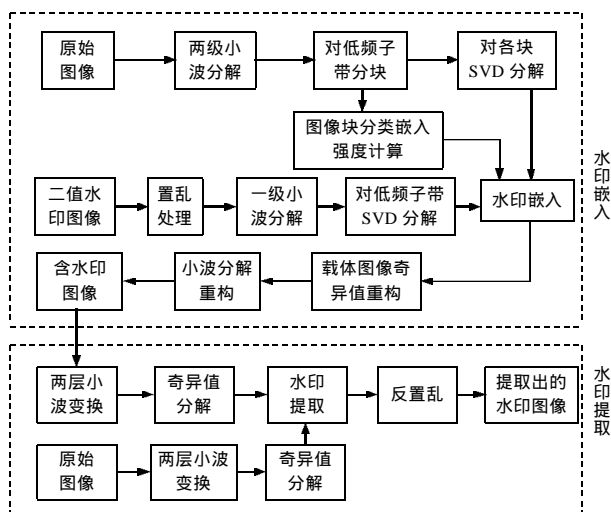


图3 分块 SVD 分解的自适应数字水印算法框架

4.2 水印嵌入

(1) 对二值水印图像 W 进行 Arnold 置乱得到 W' , 将 W' 进行一层小波变换, 提取水印低频系数 $caw1$;

(2) 对载体灰度图像 I 进行两层小波变换, 将第二层低频系数 $cA2$ 分割为互不重叠的 4×4 图像块, 计算各图像块特征值, 划分图像块所属类, 选择最佳调节因子;

(3) 将图像块进行 SVD, 得到 U_k , S_k 和 V_k 矩阵, 对 $caw1$ 进行 SVD, 得到 U_{wk} , S_{wk} 和 V_{wk} ;

(4) 将水印的奇异值依次嵌入每个图像块的第二个奇异值中

$$E_{-}S_k(2,2) = S_k(2,2) + b \times S_{wk}(i,i)$$

(5) 利用公式 $E_{-}S_k = U_k \times E_{-}S_k \times V_k^T$, 得到嵌入水印信息的低频子带系数 $cA2'$, 结合高频子带进行小波逆变换得到水印图像。

4.3 水印检测

(1) 将待测图像 I^* 作两层小波变换, 将低频系数 $cA2^*$ 分割为互不重叠的 4×4 图像块, SVD 后得到奇异值 S_k^* ; 对载体图像做同等变换, 得到载体图像奇异值 S_k , $k=1,2,\dots,m/16$;

(2) 根据公式 $S_{wk}(i,i)' = (1/b)(S_k^*(2,2) - S_k(2,2))$ 获得水印的低频系数奇异值;

(3) 由 $W_X = U_{wk} S_{wk} V_{wk}^T$ 获得水印低频子带系数, 通过小波逆变换重构图像;

(4) 水印的逆置乱。按照水印置乱的相反操作计算出待测二值水印图像 W' 。用归一化相关系数 NC 检查水印的相似度

$$NC(W', W) = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M W'(i,j) W_{i,j}}{\sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M W'^2(i,j)} \sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M W^2(i,j)}} \quad (5)$$

5 仿真实验与分析

本文仿真基于 Matlab7.8.0 环境下, 选用 'db1' 小波基。宿主图像为 512×512 大小的标准灰度图像, 如图 4(a); 水印图像是 64×64 大小的二值有意义图像, 如图 4(b); 嵌入水印后的图像和提取的水印图像分别如图 5(a) 和图 5(b) 所示。



图4 载体图像与水印图像



图5 含水印图像与提取水印

嵌入水印后图像的 PSNR=57.0884dB, 在未受任何攻击的情况下, 能够完全正确地提取水印的 NC=1, 如图 4 所示, 算法嵌入水印后对图像的品质影响较小, 透明性好。

为了测试算法的鲁棒性, 对嵌入水印后的图像分别进行了 JPEG 压缩、滤波、加噪等普通攻击。实验结果见表 1。

表1 水印图像的普通攻击测试结果

攻击类型	NC 值	攻击类型	NC 值
70% JPEG 压缩	0.9878	高斯噪声(0.005)	0.9976
50% JPEG 压缩	0.9814	高斯噪声(0.01)	0.9827
30% JPEG 压缩	0.8279	椒盐噪声(0.05)	0.9163
4 邻域均值滤波	1.0	椒盐噪声(0.1)	0.8127
8 邻域均值滤波	0.9971	乘性噪声(0.07)	0.9810
中值滤波(3×3)	1.0	乘性噪声(0.1)	0.8552
均值滤波(3×3)	0.9990	边缘锐化攻击	0.8662

根据表 1 中 NC 值判断, 算法对于 JPEG 压缩、加噪、滤波等普通攻击具有较强的鲁棒性。为了检测算法抗几何攻击性, 本文对嵌入水印后的图像进行旋转、移位、剪切、不规则划痕

等几何变换, 仿真结果如下:

(1) 旋转攻击如图 6 所示。

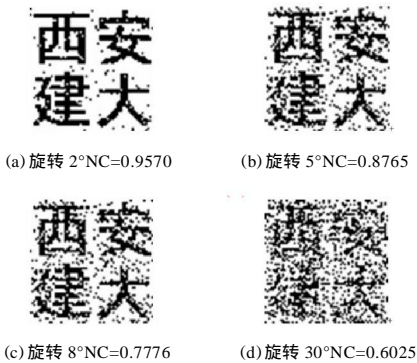


图 6 旋转攻击测试结果

(2) 移位攻击如图 7 所示。



图 7 移位攻击测试结 NC=0.8775

(3) 不规则划痕攻击如图 8 所示。

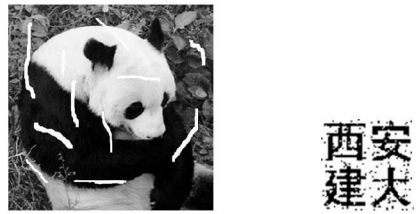


图 8 划痕攻击测试结果 NC=0.8796

(4) 剪切攻击如图 9 所示。

从实验结果可以看出, 根据攻击的强度不同, 提取出水印的效果也不同。尽管在攻击下提取出的水印图像有一定的干扰, 但是人眼能够很容易地分辨出水印信息, 说明本文算法对几何攻击鲁棒性较好, 如表 2 所示。

6 结束语

本文算法利用了图像奇异值分解强稳定性完成水印的嵌入和提取。该算法的优点是在二阶小波分解的基础上, 对小波域子带进行块划分, 根据小波块亮度、纹理等特性选择最佳水印调节因子, 实现了自适应性; 对水印图像进行频率域奇异值分解, 将水印图像的奇异值嵌入到载体图像块的奇异值中, 兼顾水印透明性的同时, 增加了鲁棒性和安全性。本文的水印算法属于非盲算法, 针对小波域 SVD 的盲水印算法将是下



图 9 剪切攻击测试结果

表 2 本算法与传统算法 NC 值比较

类型	本算法	文献[7]	文献[8]
PSNR	57.0884	36.9835	42.7720
无攻击	1.0	0.9346	1.0
50% JPEG 压缩	0.9814	0.8264	0.6935
高斯噪声(0.01)	0.9827	0.9352	0.7680
中值滤波(3×3)	1.0	0.9130	0.8552
剪切(1/4)	0.8294	0.7576	0.3681

一步的研究工作, 另外将该算法应用于彩色图像也将是一个研究方向。

参考文献:

[1] Zhou Zude,Tang Bing,Liu Xinhua.A block-SVD based image watermarking method[C].Dalian:Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control and Au-tomation,2006:10347-10351.

[2] Zhou B,Chen J.A Geometric distortion resilient image watermarking algorithm based on SVD[J].Image and Graphics,2007,9 (4):506-512.

[3] 牛少彰. 数字水印新算法的设计及鲁棒性分析 [D]. 北京: 北京邮电大学,2004.

[4] 黄良永. 二值图像 Arnold 变换的最佳置乱度 [J]. 计算机应用, 2009,40(2):73-77.

[5] 陈希,张建伟. 一种基于 SVD 分解的小波域数字水印算法 [J]. 微计算机信息,2007(12):154-157.

[6] 刘俊景,蒋华. 一种改进的 DCT 和 SVD 联合的数字图像水印算法[J].计算机工程与设计,2008,29(5):1291-1293.

[7] 沈永增. 一种新的灰度水印嵌入算法 [J]. 计算机工程与应用, 2007,43(4):56-57.

[8] 肖俊,王颖. 基于块奇异值分解的水印算法研究[J].中国科学院研究生院学报, 2006,23(3):370-376.