

# 图像小波域分块奇异值分解的自适应水印方案

张建伟 鲍政 王顺凤

(南京信息工程大学数学系, 南京 210044)

**摘要** 利用矩阵奇异值分解的单向非对称性,在研究和分析奇异值分解的正交矩阵第一列系数性质的基础上,首先给出了一种基于图像小波域奇异值分解的分块自适应水印方案,将水印嵌入其中,然后通过实验分析系数的稳定性来选择最佳的修改系数,最后利用图像的局部统计特征自适应地修改阈值,并且用两个阈值严格控制系数的修改程度,使算法达到透明性和鲁棒性之间的最优平衡。大量的实验结果表明,该算法对常见的图像处理操作均有较好的鲁棒性。

**关键词** 数字水印 小波分析 奇异值分解

**中图分类号:** TP309.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2007)05-0811-08

## Adaptive Image Watermarking Scheme Based on the Wavelet Domain SVD

ZHANG Jian-wei, BAO Zheng, WAN Sun-feng

(Department of Mathematics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044)

**Abstract** SVD preserves both one-way and non-symmetric properties. Based on the research and analysis of the first column of the orthogonal matrix after SVD, we propose a block-based image adaptive watermarking scheme based on the SVD of wavelet domain, embedding the watermark in the first column of orthogonal matrix, and selecting the best embedding coefficients by analysing the stability of those coefficients. The threshold, which is used to modify the selected coefficients is decided by the statistical properties of local blocks. The modification of coefficients is controlled by these two thresholds so as to obtain the optimal tradeoff between the transparency and the robustness. A large amount of experiments show that the proposed scheme is effective and robust to common image processing operations, especially to JPEG compression.

**Keywords** digital watermarking, wavelet analysis, singular value decomposition(SVD)

## 1 引言

随着因特网和数字技术的迅速发展,数字多媒体一直呈高速发展趋势,同时对数字内容保护技术的要求也不断增长。加密技术虽可以通过加密多媒体内容来提高其安全性,但无法阻止用户对解密数据的非法操作和复制。而通过数字水印技术对加密系统进行补充,即可追踪数字信息的传播和对多媒体内容的操作。

常见的数字水印技术是在信号的空域或频域嵌

入水印信号<sup>[1]</sup>,比如离散余弦变换(discrete cosine transform, DCT)<sup>[2]</sup>、离散小波变换(discrete wavelet transform, DWT)<sup>[3]</sup>。一般情况下,用变换域嵌入方式对信号进行处理的鲁棒性比空域更好。

奇异值分解(singular value decomposition, SVD)作为一种非常有效的数值分析技术在图像压缩、数字水印以及其他信号处理领域都有很好的应用,如今水印研究学者已提出了一些基于奇异值分解的数字水印方案<sup>[4-10]</sup>。

目前所提出的这些基于SVD分解的水印方案可分为以下两类:一类是基于奇异值的稳定性原理,

收稿日期:2005-10-17; 改回日期:2006-03-09

第一作者简介:张建伟(1965~),男,副教授。1998年获武汉大学工学硕士学位,2006年获南京理工大学工学博士学位。主要研究方向为图像处理与分析、数字水印、数值分析。E-mail: zhangjw@nuist.edu.cn

将水印添加到图像奇异值分解后的奇异值矩阵中,现在大多数的水印方案都属于这一类。如 Gorodetski 等提出两种基于 SVD 分解分块奇异值量化的盲水印技术<sup>[4]</sup>。其中一种是量化每个 SVD 块的最大奇异值;另一种则通过量化奇异值矩阵的欧氏范数来改变每个分块的所有奇异值。同时还通过实验给出了 RGB 图像格式 3 种成分的不同量化步长;Liu 和 Tan 提出的非可逆全局 SVD 方案<sup>[5]</sup>,该方案首先将伪随机水印或图像水印叠加到载体图像的奇异值矩阵中,再提取出该被修改的奇异值矩阵的奇异值矩阵,最后即得到了添加水印的图像,并给出了非可逆、错误估计及水印选择的详细分析和讨论。由于该方案是非盲的,因而提取时需要原始图像的参与。Chandra 提出的全局方案<sup>[6]</sup>是先将载体图像及水印图像都做 SVD 分解,然后将水印的奇异值添加到载体图像的奇异值中。周波等也给出了一个全局方案<sup>[7]</sup>,并应用奇异值的几何不变性从理论上分析和证明了常见的几何失真对图像奇异值的影响,包括转置、翻转、旋转、放大、平移等。Ganic 等在文献[6]和文献[7]的基础上将 DWT 和 SVD 相结合,给出了一种多水印非盲方案<sup>[8]</sup>。该方案是在一级小波分解的 4 个子带上都添加水印,大量的实验结果表明,将 DWT 和 SVD 结合具有特别的优良性。Bao 和 Ma 将 Gorodetski 的方法扩展到小波域<sup>[9]</sup>,并通过分析量化步长的统计模型,得到了一个图像自适应的小波域 SVD 方案,实验结果再次表明,将 DWT 和 SVD 相结合比单纯使用 SVD 更为优异。

Chang 等提出一种空域分块 SVD 方案<sup>[10]</sup>,它将水印信息添加到由载体图像 SVD 分解后与奇异值对应的奇异向量所组成的正交矩阵中,并利用各图像块奇异值矩阵的非零系数个数(即它的秩)来决定该块(矩阵)的复杂度,以及该块的在经过一般图像处理操作后仍可保持其正交矩阵第 1 列中相邻系数之间的关系(两相邻系数差的正负),在各块的正交矩阵第 1 列中选择两个系数,以添加 1bit 水印信息。需要指出的是,由于正交矩阵的系数值相对很小,且该算法没有确定正交矩阵第 1 列系数中的最佳待修改的相邻系数,也没有考虑各图像块的特性和固定修改阈值,是一种非自适应于图像特征的水印方案,因而嵌入水印后相邻系数的关系并不十分稳定,而且由于经过一些图像处理操作后容易失真,且易造成水印提取的错位,因而算法的鲁棒性不是太理想,且对 JPEG 压缩等都较为敏感。

本文通过对图像奇异值分解后得到正交矩阵第 1 列的数值稳定性以及对其相邻系数修改所造成的误差的实验分析,给出了一种基于图像小波域分块奇异值分解的自适应水印方案,由于它先将水印嵌入到载体图像经小波域奇异值分解后正交矩阵第 1 列的系数中,然后通过实验选择最佳的相邻系数,并采用图像的局部统计特征自适应决定修改阈值,用不同的阈值严格控制系数的修改幅度,因此在算法的透明性和鲁棒性之间达到了最优平衡。

## 2 数字图像的 SVD 分解

从线性代数角度看,任意一幅数字图像都可以看成一个  $m \times n$  大小的实矩阵,给定一个  $m \times n$  大小的 pixels(以下单位省)实矩阵  $A$ ,其 SVD 分解可表示为

$$A = USV^T = \sum_{i=1}^r \lambda_i U_i V_i^T \quad (1)$$

其中  $U$  和  $V$  分别为  $m \times m$  及  $n \times n$  大小的正交矩阵, $S = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_r, 0, \dots, 0)$  为非负对角矩阵,其对角元素  $\lambda_i$  即为矩阵  $A$  的奇异值,且满足  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_r > 0$ ,  $r$  为  $S$  的秩。

**定理** 设任意两个大小为  $m \times n$  的实矩阵  $A$  和  $B$  的奇异值分别为  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_n, \tau_1 \geq \tau_2 \geq \dots \geq \tau_n$ , 则对于  $R^{n \times n}$  上任一种酉不变范数  $\|\cdot\|$ , 有

$$\|\text{diag}(\tau_1 - \sigma_1, \dots, \tau_n - \sigma_n)\| \leq \|B - A\| \quad (2)$$

由此可见, $A$  的奇异值特征向量具有良好的稳定性,这也是 SVD 水印方案的数学基础。

因为 SVD 具有 DCT、DWT 等不具备的单向性和非对称性等优点,所以它在数字图像处理中有着很广的应用。这些优点为:(1) 进行 SVD 的矩阵大小不固定,正方形、矩形都可以;(2) 奇异值具有良好的稳定性,奇异值的轻微扰动不会影响图像的视觉质量;(3) 每个奇异值  $\lambda_i$  决定了一个 SVD 图像层的亮度(能量),同时其对应的两个奇异向量  $U_i$  及  $V_i^T$  决定了图像的几何特征,特别地,正交矩阵  $U$  的第 1 列向量(以下简称  $U_1$ )的两个相邻系数在经过图像处理操作后,仍能保持绝对值差的正负关系<sup>[10]</sup>。

## 3 小波域奇异值分解自适应水印方案

### 3.1 $U_1$ 的相邻系数稳定性分析及最佳系数对的选取

通过实验对图像直接在空域进行 SVD 分解后的  $U_1$  及其小波域 SVD 分解后的  $U_1$  这两者的相邻

系数的稳定性进行稳定性分析,并选择最佳的待修改系数对。

实验以 Boat、Lena、Baboon 这 3 个图像为主,分别代表纹理特征为简单、中等、复杂的 3 类不同图像,此外,还随机选取了大量图像进行反复实验。以

Lena 图像为示例,表 1、表 2 分别给出了从该图及其一层小波分解后的低频分量中分别提取的某  $8 \times 8$  大小的子块,其先通过常见的 JPEG 压缩、滤波等处理,再进行 SVD 分解后即得到正交矩阵的第 1 列向量  $U_1$ 。

表 1 空域 SVD 后的  $U_1$

Tab. 1  $U_1$  of SVD decomposition on spatial domain

|       | 初始值      | JPEG100  | JPEG90   | JPEG70   | JPEG50   | JPEG30   | JPEG10   | 3 × 3 中值滤波 | 1% 高斯噪声  |
|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|------------|----------|
| $U_1$ | -0.35694 | -0.35694 | -0.35643 | -0.35633 | -0.35355 | -0.35355 | -0.35355 | -0.35494   | -0.34788 |
|       | -0.35352 | -0.35352 | -0.35358 | -0.35605 | -0.35355 | -0.35355 | -0.35355 | -0.35465   | -0.36714 |
|       | -0.35351 | -0.35351 | -0.35329 | -0.35492 | -0.35355 | -0.35355 | -0.35355 | -0.35436   | -0.36049 |
|       | -0.35435 | -0.35436 | -0.355   | -0.35408 | -0.35355 | -0.35355 | -0.35355 | -0.35408   | -0.3935  |
|       | -0.35239 | -0.35239 | -0.35444 | -0.35295 | -0.35355 | -0.35355 | -0.35355 | -0.35323   | -0.36945 |
|       | -0.35351 | -0.35351 | -0.35131 | -0.35182 | -0.35355 | -0.35355 | -0.35355 | -0.3521    | -0.32842 |
|       | -0.35124 | -0.35124 | -0.35103 | -0.35126 | -0.35355 | -0.35355 | -0.35355 | -0.35267   | -0.32196 |
|       | -0.35295 | -0.35294 | -0.3533  | -0.35098 | -0.35355 | -0.35355 | -0.35355 | -0.35238   | -0.33374 |

表 2 小波域 SVD 后的  $U_1$

Tab. 2  $U_1$  of SVD decomposition on Wavelet Domain

|       | 初始值      | JPEG100  | JPEG90   | JPEG70   | JPEG50   | JPEG30   | JPEG10   | 3 × 3 中值滤波 | 1% 高斯噪声  |
|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|------------|----------|
| $U_1$ | -0.34554 | -0.34557 | -0.34519 | -0.347   | -0.34782 | -0.34596 | -0.34792 | -0.34684   | -0.34801 |
|       | -0.34928 | -0.34924 | -0.34997 | -0.3482  | -0.34782 | -0.34596 | -0.34792 | -0.34857   | -0.32989 |
|       | -0.34911 | -0.34921 | -0.3493  | -0.35036 | -0.34782 | -0.34596 | -0.34792 | -0.34886   | -0.33347 |
|       | -0.34965 | -0.34981 | -0.34873 | -0.35181 | -0.34782 | -0.34596 | -0.34792 | -0.35054   | -0.35441 |
|       | -0.35407 | -0.35396 | -0.35406 | -0.35365 | -0.35273 | -0.35378 | -0.3591  | -0.35307   | -0.35895 |
|       | -0.35588 | -0.35591 | -0.35636 | -0.35456 | -0.35664 | -0.35818 | -0.3591  | -0.35593   | -0.37242 |
|       | -0.36042 | -0.36038 | -0.36048 | -0.35874 | -0.36169 | -0.36376 | -0.3591  | -0.36054   | -0.36714 |
|       | -0.36407 | -0.36396 | -0.36393 | -0.3638  | -0.36559 | -0.36808 | -0.3591  | -0.36371   | -0.36182 |

在反复实验的基础上,通过对  $U_1$  进行比较分析得到以下 3 个结论:

(1) 不论是空域 SVD,还是小波域 SVD,所得到的  $U_1$  的相邻系数之间都具有一定的稳定性。如表 1 中,初始时

$$U_1(4) - U_1(5) = -0.35435 - (-0.35239) = -0.00196$$

在经过 100% 的 JPEG 压缩后

$$U_1(4) - U_1(5) = -0.35436 - (-0.35239) = -0.00197$$

也就是说,由于  $U_1(4)$  和  $U_1(5)$  之间经过 JPEG 压缩后依然保持着一种负号的关系,同样在中值滤波或叠加高斯噪声后这种关系仍能保持,所以可以通过调节

$U_1$  相邻系数之间的正负关系来嵌入水印信息。

(2) 小波域 SVD 分解得到的  $U_1$  要比空域 SVD 分解得到的  $U_1$  稳定性好。如表 1 中,经过 70% JPEG 压缩后, $U_1(4)$  和  $U_1(5)$  的负号关系勉强可以保持,但是此时其他相邻系数间的正负关系已出错,如  $U_1(3)$  和  $U_1(4)$  本来是正关系,此时却变成负关系。此外,对于该图像,经过低于 70% 的 JPEG 压缩后, $U_1$  全部变为相同的数 (-0.35355)。也就是说,在选择最好的系数对的情况下,空域 SVD 分解后的  $U_1(4)$  和  $U_1(5)$  只能在 70% 或以上的 JPEG 压缩的情况下质量才保持稳定,这也是文献[10]的最大不足之处。但如表 2 所示,在 70% 及以上的 JPEG 压缩中, $U_1$  都能较好保持其相邻系数间的正负关系,而且适当的

相邻系数(如  $U_1(4)$  和  $U_1(5)$ )经过 10% 的 JPEG 压缩后仍能保持正负关系,类似的,在滤波和叠加噪声后小波域 SVD 的  $U_1$  也比空域 SVD 的  $U_1$  稳定。

(3) 对于  $8 \times 8$  的图像块,最稳定(最佳)的相邻系数为  $U_1(4)$  和  $U_1(5)$ 。如表 1 及表 2 所示,  $U_1(4)$  和  $U_1(5)$  (表中黑体字的两行)的关系总是最稳定的,特别在表 2 中,从 50% JPEG 压缩到 10% JPEG 压缩最为明显。

### 3.2 算法描述

算法以 3.1 节的 3 个结论为基础,以二值图像作为水印,先对载体图像经一层小波分解后的低频分量做适当分块,再通过改变各块 SVD 分解后得到的  $U_1$  中最佳相邻系数的正负关系嵌入 1bit 水印信息,并利用两个阈值来控制相邻系数的修改程度,以达到透明性和鲁棒性的最优平衡,由于该水印的提取算法是盲的,因而不需要原始图像的参与,其嵌入水印的过程如下:

(1) 对载体图像进行一层小波分解,首先提取其低频分量  $LL$ ,然后将  $LL$  分成互不重叠的大小为  $m \times m$  的子块,记为  $B_k, k=1, 2, \dots, N$ ,这里,  $N$  为分块的总数。一般地,考虑到嵌入水印的容量和  $U_1$  的特点,取  $m$  为 8;

(2) 对每一子块  $B_k (k=1, 2, \dots, N)$  进行如下操作:

① 对 SVD 分解得到的  $U_1$ , 计算其相邻系数  $U_1(4)$  和  $U_1(5)$  的差  $d = U_1(4) - U_1(5)$ , 并记录其符号  $s = \text{sgn}(d)$ ,  $\text{sgn}()$  为符号函数;

② 设当前待嵌入的是二值图像的某个水印位为  $b(1$  或  $0)$ , 分如下两种情况嵌入:

情形 1:  $s=1$ :

若  $b=s$ ,

若  $d$  的绝对值大于等于给定阈值  $t_1$ , 即  $\text{abs}(d) \geq t_1$ , 则  $U_1(4)$  和  $U_1(5)$  保持不变; 否则, 按下式修改  $U_1(4)$  和  $U_1(5)$ , 使  $d$  不小于阈值  $t_1$ :

$$\begin{cases} U_1(4) = U_1(4) + (t_1 - d)/2 \\ U_1(5) = U_1(5) - (t_1 - d)/2 \end{cases} \quad (3)$$

若  $b \neq s$ ,

若  $\text{abs}(d) \geq t_1$ ,

若  $\text{abs}(d) > t_2$ , 则通过下式修改  $U_1(4)$  和  $U_1(5)$ , 使  $d$  不大于阈值  $t_2$ :

$$\begin{cases} U_1(4) = U_1(4) - (t_2 + d)/2 \\ U_1(5) = U_1(5) + (t_2 + d)/2 \end{cases} \quad (4)$$

否则交换  $U_1(4)$  和  $U_1(5)$ ;

否则, 按下式修改  $U_1(4)$  和  $U_1(5)$  使  $d$  不小于阈值  $t_1$ :

$$\begin{cases} U_1(4) = U_1(4) - (t_1 + d)/2 \\ U_1(5) = U_1(5) + (t_1 + d)/2 \end{cases} \quad (5)$$

情形 2:  $s=-1$ , 令  $s=0$ :

若  $b=s$ ,

若  $d$  的绝对值大于等于给定阈值  $t_1$ , 即  $\text{abs}(d) \geq t_1$ , 则  $U_1(4)$  和  $U_1(5)$  保持不变; 否则, 按下式修改  $U_1(4)$  和  $U_1(5)$ , 使  $d$  不小于阈值  $t_1$ :

$$\begin{cases} U_1(4) = U_1(4) - (t_1 + d)/2 \\ U_1(5) = U_1(5) + (t_1 + d)/2 \end{cases} \quad (6)$$

若  $b \neq s$ ,

若  $\text{abs}(d) \geq t_1$ ,

若  $\text{abs}(d) > t_2$ , 则通过下式修改  $U_1(4)$  和  $U_1(5)$ , 使  $d$  不大于阈值  $t_2$ :

$$\begin{cases} U_1(4) = U_1(4) + (t_2 - d)/2 \\ U_1(5) = U_1(5) - (t_2 - d)/2 \end{cases} \quad (7)$$

否则交换  $U_1(4)$  和  $U_1(5)$ ;

否则, 按下式修改  $U_1(4)$  和  $U_1(5)$ , 使  $d$  不小于阈值  $t_1$ :

$$\begin{cases} U_1(4) = U_1(4) + (t_1 - d)/2 \\ U_1(5) = U_1(5) - (t_1 - d)/2 \end{cases} \quad (8)$$

该步骤是通过两个阈值  $t_1, t_2$  来控制 and 调节算法的鲁棒性和透明性(阈值的确定下一节讨论)。

③ 由修改后的  $U_1$  计算嵌入水印后的该图像块:

$$\hat{B}_k = \sum_{i=1}^r \lambda_i U_i V_i^T \quad (9)$$

其中,  $r \leq 8$  为该块奇异值矩阵的秩。

(3) 由所有的  $\hat{B}_k, k=1, 2, \dots, N$  来构造添加水印后的低频分量, 最后用逆小波变换来得到添加水印的图像。

需要说明的是, 若想进一步增强算法的安全性, 则可以采用伪随机序列或混沌序列等对水印图像做一个加密置换, 也可以用类似的方法从所有的图像块中随机抽取一个  $B_k$  来嵌入一个水印位, 两种方法的原理相同, 既可起到加密的作用, 又可增强对特定处理(如剪切等)的抗性。本文以一个密钥  $K$  作为种子来生成一个混沌序列, 并采用后一种方法随机抽取一个图像块嵌入水印信息。

由于水印的盲提取过程中并不需要  $t_1, t_2$  两个阈值, 通过待测相邻系数之间的正负关系直接即可

完成水印提取,因此简单易行。其具体步骤如下:

(1) 对加水印图像进行一层小波分解,提取其低频分量  $LL$ ,先得到  $\hat{B}_k, k=1,2,\dots,N$ ;

(2) 对每一个  $\hat{B}_k$  进行 SVD 分解,则得到  $\hat{U}_1$ ,再计算相邻系数  $\hat{U}_1(4)$  和  $\hat{U}_1(5)$  的差  $\hat{d} = \hat{U}_1(4) - \hat{U}_1(5)$ ,及  $\hat{d}$  的符号  $\hat{s} = \text{sgn}(\hat{d})$ 。若  $\hat{s} = 1$ ,则提取的水印位为 1;否则提取的水印位为 0;

(3) 最后将所有提取的水印位按一定的顺序排列,即得到提取的水印图像。

$$A - \hat{A} = \left( \lambda_1 U_1 V_1^T + \sum_{i=2}^r \lambda_i U_i V_i^T \right) - \left( \lambda_1 \hat{U}_1 V_1^T + \sum_{i=2}^r \lambda_i U_i V_i^T \right) = \lambda_1 (U_1 - \hat{U}_1) V_1^T$$

$$= \lambda_1 \begin{pmatrix} 0 \\ U_1(2) - \hat{U}_1(2) \\ U_1(3) - \hat{U}_1(3) \\ 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_1(1) \\ V_1(2) \\ V_1(3) \\ V_1(4) \end{pmatrix}^T \xrightarrow{\begin{matrix} k_1 = U_1(2) - \hat{U}_1(2) \\ k_2 = U_1(3) - \hat{U}_1(3) \end{matrix}} \lambda_1 \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ k_1 V_1(1) & k_1 V_1(2) & k_1 V_1(3) & k_1 V_1(4) \\ k_2 V_1(1) & k_2 V_1(2) & k_2 V_1(3) & k_2 V_1(4) \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (10)$$

由上式可知,首先,矩阵的失真发生在  $U_1$  的相邻系数所在的行,而  $U_1$  其他未改变的系数所在行不变;其次,矩阵的变化与  $U_1$  所对应的奇异值  $\lambda_1$  以及  $U_1$  相邻系数的改变量  $k_1, k_2$  这两个值呈一定的正比关系,而本文算法直接对相邻系数进行调整或互换,显然后者对图像失真的影响更为重要,特别地,由于在相邻系数互换后,  $k_1, k_2$  的改变最大,且与相邻系数的差成正比,因而,此时对图像的影响最为严重。

$\lambda_1$  作为最大的奇异值,因为其决定了最重要的 SVD 分解图像层的亮度,所以可把  $\lambda_1$  近似地理解成图像块的平均亮度,这样就在最大奇异值和该图像块的均值之间建立了联系;类似的,在实验中发现,相邻系数的差基本上体现了图像块的结构,这也与图像块的标准差相关联。

阈值  $t_1$  主要用于  $U_1$  相邻系数的差  $d$  过小时,限制  $d \geq t_1$  以实现算法鲁棒性和透明性最优平衡,在嵌入水印需要互换  $U_1$  相邻系数的时候可用阈值  $t_2$  控制  $d$ ,即  $d \leq t_2$ ,以免因  $d$  过大而造成图像块在水平方向产生严重失真。 $t_1$  的确定部分借鉴了文献[9]的思想,使其适应于图像的局部特征。具体的方法如下:

(1) 计算由 3.2 节水印嵌入阶段得到的各图像块的均值  $m_{B_k}$  及标准差  $\sigma_{B_k}$ ;

(2) 计算每个  $B_k$  的  $\theta_k$  值:

$$\theta_k = \alpha \times m_{B_k} + \beta \times \sigma_{B_k} \quad (11)$$

其中,  $\alpha$  及  $\beta$  为权值因子;

(3) 计算所有  $\theta_k$  的最大值  $\theta_{\max}$  及最小值  $\theta_{\min}$ ;

(4) 按下式计算每一个  $B_k$  的阈值  $t_k$ :

### 3.3 失真分析及阈值确定

嵌入水印对图像的影响,一个是由  $U_1(4)$  和  $U_1(5)$  的互换造成的,另一个是由  $t_1$  和  $t_2$  两个阈值对  $U_1(4)$  和  $U_1(5)$  进行调节造成的。

为了便于理解,设对任意的  $4 \times 4$  矩阵  $A$  进行 SVD 分解,就可以得到  $U, S, V$ ,其中只有  $U_1(2)$  和  $U_1(3)$  发生以上的改变,设其分别改变为  $\hat{U}_1(2)$  和  $\hat{U}_1(3)$ ,进而由此得到  $\hat{A}$ ,则理想状态下矩阵的失真为

$$t_k = t_{\max} - (t_{\max} - t_{\min}) \times \frac{\theta_k - \theta_{\min}}{\theta_{\max} - \theta_{\min}} \quad (12)$$

其中,  $t_{\max}$  及  $t_{\min}$  分别表示  $t_k$  所允许的最大值和最小值。

实验中,一般取  $\alpha = 1.0, \beta = 5.0, t_{\min} \in [0.002, 0.004], t_{\max} \in [0.008, 0.012]$ 。阈值  $t_2$  一般取在  $t_{\max}$  及  $t_{\min}$  之间。

## 4 实验结果及讨论

本节给出了本文算法的实验结果,以  $512 \times 512$  的标准灰度图像“Lena”、“Boat”、“Baboon”为载体图像,以  $32 \times 32$  的二值图像“NUIST”作为水印。本文用峰值信噪比 (peak signal noise ratio, PSNR) 评价载体图像与含水印图像之间的差别,人眼观察的主观评价即可作为提取的二值水印的评价标准,并以提取水印的位错率 (bit error ratio, BER) 作为水印质量的客观评判标准。

实验中,参数  $K = 3, \alpha = 1, \beta = 5, t_{\min} = 0.002, t_{\max} = 0.008, t_2 = 0.006$ 。为了使算法更具实用性,所有的测试图像都转换为 JPEG 格式。另外,除 JPEG 压缩、小波压缩及滤波操作外,其余攻击实验都是在 Photoshop 软件上完成的,以下给出鲁棒性实验结果及其抗攻击性能分析。

图 1(a)、图 1(c)、图 1(e) 分别是 Lena、Boat、Baboon 原始图像,图 1(b)、图 1(d)、图 1(f) 是本文算法嵌入的二值水印图像;图 2(a)、图 2(c)、图 2(e) 分别是 Lena、Boat、Baboon 图像嵌入水印后的图像,各自的 PSNR 值分别为 45.637dB、42.766dB、

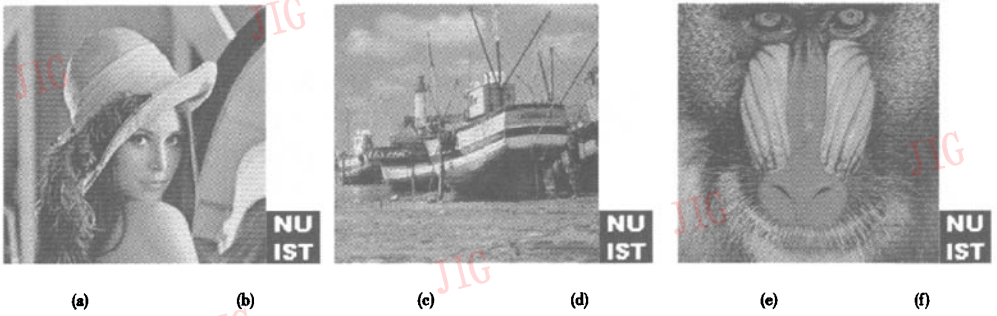


图 1 载体图像及其水印信号

Fig.1 Host image and watermark

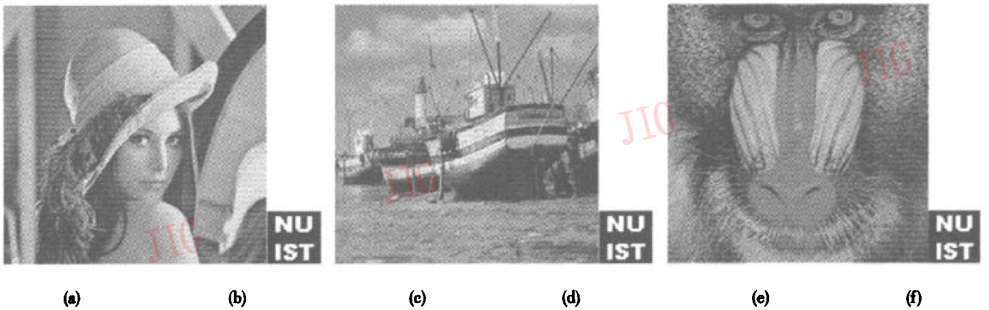


图 2 含水印图像及提取的水印

Fig.2 Watermarked image and detected watermark

40.182dB,图 2(b)、图 2(d)、图 2(f)是本文算法对所对应的含水印图像中提取的二值水印图。主观观察视觉效果表明,人眼基本无法辨别含水印图像与原始载体图像的差别,且由于采用的二值水印感知上可视,所以提取的水印信息很容易辨别,并且含水印图像的 PSNR 值保持在一个较高的水平。在实验中发现,若通过调整参数来降低 PSNR 值,虽然和其他水印方案相比,PSNR 值仍较好( $\geq 41\text{dB}$ ),但却会出现如式(10)所给出的某些图像块的水平失真。

下面针对嵌入水印的“Lena”图像进行鲁棒性实验。

图 3 给出了含水印的 Lena 图像经过 JPEG 压缩和小波压缩操作后提取水印的实验结果。图 3(a)~(e)分别为经 JPEG 压缩(质量因子分别为 90%、

70%、50%、30%、25%)后(对应的 PSNR 值分别为 39.236dB、36.369dB、35.020dB、33.631dB、33.082dB)再提取的水印,其对应的 BER 值分别为 0.00195、0.01758、0.04492、0.12012、0.16113,实验结果表明,本文算法对 JPEG 压缩具有很好的鲁棒性,即使在 25% 的压缩因子下,都能较准确地提取水印信号;图 3(f)~(i)为经小波压缩(bpp 分别为 8.00、3.50、1.50、0.80)后(对应的 PSNR 值分别为 45.390dB、43.452dB、39.452dB、37.305dB)再提取的水印,其对应的 BER 分别为 0、0.00391、0.02148、0.20703,实验结果表明,本文算法对小波压缩也具有一定的鲁棒性,只有在低于 0.80bpp 的压缩条件下,所提取的水印开始明显模糊。

图 4 中给出了含水印的 Lena 图像经过剪切、叠

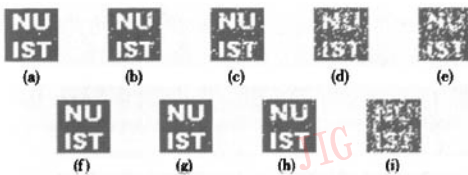


图 3 JPEG 压缩及小波压缩实验结果

Fig.3 Detected watermark on JPEG and wavelet encoded image



图 4 剪切、叠加噪声及滤波的实验结果

Fig.4 Detected watermark on clipped, noised and filtered image

加噪声及滤波操作后提取水印的实验结果。图 4(a)~(c)分别是经中心裁剪 1/4、随机裁剪、局部马赛克后(对应的 PSNR 值分别为 11.313dB、13.233dB、31.573dB)提取的水印,其对应的 BER 值分别为 0.056 64、0.083 98、0.051 76;图 4(d)~(f)分别是经 5% 均匀噪声、5% 高斯噪声、1% 椒盐噪声后(对应的 PSNR 值分别为 29.833dB、25.575dB、25.058dB)提取出的水印,其对应的 BER 值分别为 0.106 45、0.177 73、0.168 95;图 4(g)~(i)分别是经 3×3 Wiener 滤波、3×3 中值滤波、3×3 高斯滤波后(对应的 PSNR 值分别为 36.822dB、34.789dB、39.563dB)提取的水印,其对应的 BER 值分别为 0.150 39、0.152 34、0.035 16。实验结果表明,本文算法对剪切、马赛克、高斯滤波具有一定的鲁棒性,对叠加噪声、Wiener 滤波及中值滤波提取效果相对差一些,但是仍可识别。

图 5 中示出了含水印的 Lena 图像经过锐化、模糊及扭曲操作后提取水印的实验结果。图 5(a)~图 5(c)分别是经锐化、边缘锐化、加强锐化后(对应的 PSNR 值分别为 32.864dB、37.092dB、26.181dB)提取的水印,其对应的 BER 值分别为 0.005 86、0.001 95、

0.015 63;图 5(d)~(f)分别是经模糊、加强模糊、运动模糊(10pixels)后(对应的 PSNR 值分别为 37.864dB、34.064dB、25.584dB)提取的水印,其对应的 BER 值分别为 0.052 73、0.157 23、0.046 88;图 5(g)~(i)分别是经 ZigZag 扭曲(1,5)、波纹扭曲(50%)、旋转扭曲(5dg)后(对应的 PSNR 值分别为 29.195dB、32.412dB、24.677dB)提取的水印,其对应的 BER 值分别为 0.092 77、0.106 45、0.209 66。实验结果表明,本文算法对锐化、模糊及一些较轻微的扭曲失真具有一定的鲁棒性。

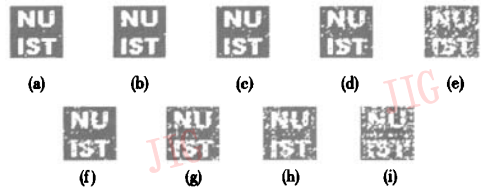


图 5 锐化、模糊及扭曲的实验结果

Fig. 5 Detected watermark on sharpened, blurred and distorted image

表 3 给出了本文提出的方案与文献[10]方法的实验性能比较。

表 3 本方案与文献[10]方案的性能比较(位错率 BER)

Tab.3 Performance comparison of our scheme and reference 10

|          | JPEG 压缩(质量因子) |          |          |          |          | 裁剪 1/4   | 5% 高斯噪声  | 锐化       | 模糊       |
|----------|---------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|          | 90%           | 70%      | 50%      | 30%      | 25%      |          |          |          |          |
| 本文算法     | 0.001 95      | 0.017 58 | 0.044 92 | 0.120 12 | 0.161 13 | 0.056 64 | 0.177 73 | 0.005 86 | 0.052 73 |
| 文献[10]算法 | 0.043 21      | 0.273 93 | 0.338 38 | 0.354 25 | 0.346 44 | 0.067 87 | 0.293 21 | 0.010 74 | 0.054 69 |

## 5 结 论

目前基于 SVD 分解的水印方案并不是很多,而且多数都是将水印信息嵌入的图像的奇异值中,利用 SVD 分解的正交矩阵嵌入水印的很少见。本文在分析小波域 SVD 分解的正交矩阵中第一列相邻系数关系的稳定性的基础上,选择出最佳的相邻系数嵌入水印信息,并且讨论了对 SVD 分解的正交矩阵中第一列相邻系数的改变对图像失真所造成的影响,据此利用两个阈值平衡算法的透明性和鲁棒性,控制图像的失真,通过图像的局部统计特征确定阈值的大小,使算法自适应于图像特征。同时在描述算法的基础上,给出了实验结果及其抗攻击性能分析,实

验表明,本文提出的水印方案是有效的,在保证水印有较好的透明性的同时,对常见图像处理操作以及裁剪、轻微扭曲等几何攻击具有较好的鲁棒性,特别是对 JPEG 压缩,其鲁棒性更强。另外,阈值的选择取决于图像的局部特征,使得水印嵌入具有自适应调节特性,与此同时也增强了算法的鲁棒性,且水印提取不需要利用原图像,具有较强的实用性。

## 参考文献 (References)

- 1 Cox I J, Miller M L, Bloon J A. Digital watermarking[M]. Morgan Kaufmann Publishers, San Francisco, CA, 2001: 89~152.
- 2 Cox I J, Kilian J, Leighton F T, et al. Secure spread spectrum watermarking for multimedia [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(12): 1673~1687.
- 3 Meerwald P, Uhl A. A survey of wavelet-Domain watermarking

- algorithms [ A ]. In: Proceedings of SPIE Symposium, Electronic Imaging, Conference on Security and Watermarking of Multimedia Contents [ C ], San Jose, CA, USA, 2001: 20 ~ 26.
- 4 Gorodetski V I, Popyack L J, Samoilov V, *et al.* SVD-based approach to transparent embedding data into digital images [ A ]. In: International Workshop on Mathematical Methods, Models and Architectures for Computer Network Security (MMM-ACNS 2001) [ C ], St. Petersburg, Russia, May 21 ~ 23, 2001.
- 5 Liu R, Tan T. A SVD-Based watermarking scheme for protecting rightful ownership [ J ]. IEEE Transactions on Multimedia, 2002, 4(1): 121 ~ 128.
- 6 Chandra D V S. Digital image watermarking using singular value decomposition [ A ]. In: Proceedings of 45th IEEE Midwest Symposium on Circuits and Systems [ C ], Tulsa, OK, USA, 2002: 264 ~ 267.
- 7 Zhou Bo, Chen Jian. A geometric distortion resilient image watermarking algorithm based on SVD [ J ]. Chinese Journal of Image and Graphics, 2004, 9(4): 506 ~ 512. [ 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 ]. 中国图象图形学报, 2004, 9(4): 506 ~ 512. ]
- 8 Ganic E, Eskicioglu A M. Robust DWT-SVD domain image watermarking: Embedding data in all frequencies [ A ]. In: Proceedings of the Multimedia and Security Workshop ' 2004 [ C ], Magdeburg, Germany, 2004: 166 ~ 174.
- 9 Bao P, Ma X. Image adaptive watermarking using Wavelet domain singular value decomposition [ J ]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2005, 15(1): 96 ~ 102.
- 10 Chin-chen Chang, Piyu Tsai, Min-Hui Lin. SVD-based digital image watermarking scheme [ J ]. Pattern Recognition Letters, 2005, 26(10): 1577 ~ 1586.