

文章编号:1007-5321(2010)03-0126-04

# 强鲁棒零水印技术

叶天语, 马兆丰, 钮心忻, 杨义先

(1. 北京邮电大学 网络与交换技术国家重点实验室, 北京 100876; 2. 北京邮电大学 网络与信息攻防技术教育部重点实验室, 北京 100876;  
3. 北京邮电大学 灾备技术国家工程实验室, 北京 100876)

**摘要:** 为了提高鲁棒水印技术的鲁棒性, 提出一种基于离散小波变换(DWT)和奇异值分解(SVD)的零水印技术. 首先对原始载体图像进行离散小波变换, 然后选择低频子带进行分块奇异值分解, 最后通过判断每个子块最大奇异值的最高位数字奇偶性产生鲁棒零水印. 实验结果表明, 零水印技术对各种攻击具备很强的鲁棒性.

**关键词:** 离散小波变换; 奇异值分解; 零水印; 鲁棒性

**中图分类号:** TN911.7

**文献标志码:** A

## A Zero-Watermark Technology with Strong Robustness

YE Tian-yu, MA Zhao-feng, NIU Xin-xin, YANG Yi-xian

(1. State Key Laboratory of Networking and Switching Technology, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;  
2. Key Laboratory of Network and Information Attack and Defence Technology, Ministry of Education, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China; 3. National Engineering Laboratory for Disaster Backup and Recovery, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

**Abstract:** In order to enhance the robustness of roust watermark technology, a zero-watermark technology is proposed based on discrete wavelet transformation (DWT) and singular value decomposition(SVD). It conducts DWT with the original image, divides its low frequency band into blocks, and conducts SVD with every block. Zero-watermark is derived by judging the parity of the first digit of the biggest singular value in every block. Experiments show that it possesses strong robustness against various attacks.

**Key words:** discrete wavelet transformation; singular value decomposition; zero-watermark; robustness

## 0 引言

鲁棒数字水印技术具有抵抗攻击的能力, 对于实现数字产品的版权认证具有重要意义. 许多学者<sup>[1-6]</sup>致力于设计新颖且性能良好的鲁棒水印技术. 在保证具有良好不可见性的基础上, 如何尽量提高鲁棒性是设计鲁棒水印技术的研究重点.

文献[4]提出零水印的概念, 提取原始载体的

稳定特征产生水印, 有效地解决了不可见性与鲁棒性之间的矛盾. 零水印技术能否具有强鲁棒性的关键在于所利用的图像特征, 对外在干扰是否具有强稳定性.

离散小波变换(DWT)<sup>[5]</sup>具有良好的局部时频分析特性和多分辨率分析特性, 与人眼视觉特性相符. 图像经过DWT后分割成水平、垂直、对角线3个细节子带和1个低频子带, 低频子带可以继续分

收稿日期: 2009-08-25

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划项目(2007CB311203); 国家自然科学基金项目(60821001, U0835001, 60803157); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20070013007); 国家标准制定计划项目(20080200-T-339); 国家质检公益性科研专项项目(10-126)

**作者简介:** 叶天语(1982—), 男, 博士生, E-mail: flystu008@yahoo.com.cn; 马兆丰(1974—), 男, 副教授.

解. 3个细节子带的能量都较少, 图像的总能量主要集中在低频子带, 所以低频子带具有能量聚集效应. 因此, 低频子带的系数对外在干扰具有更好的稳定性.

文献[6]指出, 图像经奇异值分解(SVD)后得到的奇异值具有相当好的稳定性, 当图像受到轻微扰动时, 它的奇异值不会发生剧烈变化. 那么, 最大奇异值的最高位数字奇偶性也相对稳定.

综合上述分析, 如果首先对原始载体图像进行DWT, 再对其低频子带进行分块SVD, 然后通过判断每个子块最大奇异值的最高位数字奇偶性产生零水印, 该零水印技术将可能具有强鲁棒性. 因为没有对原始载体图像做任何改变, 所以又具有相当好的不可见性.

## 1 鲁棒零水印产生

原始载体图像  $I$  大小为  $M \times M$ . 鲁棒零水印产生过程如下.

1) 将  $I$  进行  $n$  层 DWT.

2) 将第  $n$  层低频子带  $L$  分成不重叠的  $m \times m$

子块.  $L$  的大小为  $\frac{M}{2^n} \times \frac{M}{2^n}$ . 子块总数为  $K =$

$\left(\frac{M}{2^n m}\right)^2$ . 每个子块记为  $L_i, i = 1, 2, \dots, K$ . 因此,

$$L = \bigcup_{i=1}^K L_i.$$

3) 对每个子块进行 SVD, 即  $L_i = U_i \Sigma_i V_i^T$ . 其中,  $U_i$  和  $V_i$  为正交矩阵;  $\Sigma_i$  为对角阵,  $\sigma_i^k (k = 1, 2, \dots, m)$  为其  $m$  个奇异值.

4) 通过判断每个子块最大奇异值的最高位数字奇偶性, 产生鲁棒零水印  $w$ . 如果  $\sigma_i^1$  的最高位数字是奇数, 则  $w_i = 1$ ; 否则,  $w_i = 0$ , 其中  $w_i$  是  $w$  的第  $i$  比特水印. 保存零水印, 用于版权认证.

## 2 鲁棒零水印提取和版权认证

鲁棒零水印提取过程与第1部分类似. 将攻击图像  $H$  的第  $n$  层低频子带  $L'$  分成不重叠的  $m \times m$  子块. 对每个子块进行 SVD, 通过判断每个子块最大奇异值的最高位数字奇偶性提取鲁棒零水印  $w'$ . 如果  $\sigma_i^1$  的最高位数字是奇数, 则  $w'_i = 1$ ; 否则,  $w'_i = 0$ .

定义相似度为  $s = 1 - \frac{\sum_{j=1}^K w_j \oplus w'_j}{K}$ , 其中  $\oplus$  代表

异或运算. 如果所保存的原始零水印  $w$  与  $w'$  间的

相似度  $s$  大于阈值  $t$ , 则认为版权申诉者合法拥有该作品的版权.

## 3 阈值选择

原始图像为 Lena、Peppers、Baboon、Sailboat、Frog 和 Elain, 都是大小为  $512 \times 512$  的 256 灰度级图像, 见图1. 对图像进行3层DWT, 以Harr小波作为小波基. 低频子带的分块大小为  $4 \times 4$ , 因此水印序列长度为 256 bit. 不同图像零水印间的相似度见表1, 最小的相似度为 0.464 8, 最大的相似度为 0.554 7. 产生 99 个服从均匀分布的随机序列, 计算它们与 Lena 图像零水印间的相似度, 结果如图2所示. 第50个序列为 Lena 图像零水印. 图2中, 除第50个序列外, 其他相似度都在 0.5 上下小幅度波动. 本文第4部分对抗攻击的鲁棒性进行了测试. 根据这些实验结果, 认为将 0.87 作为阈值已经足够大, 则当  $s > 0.87$  时, 认为版权申诉者合法拥有该作品的版权.

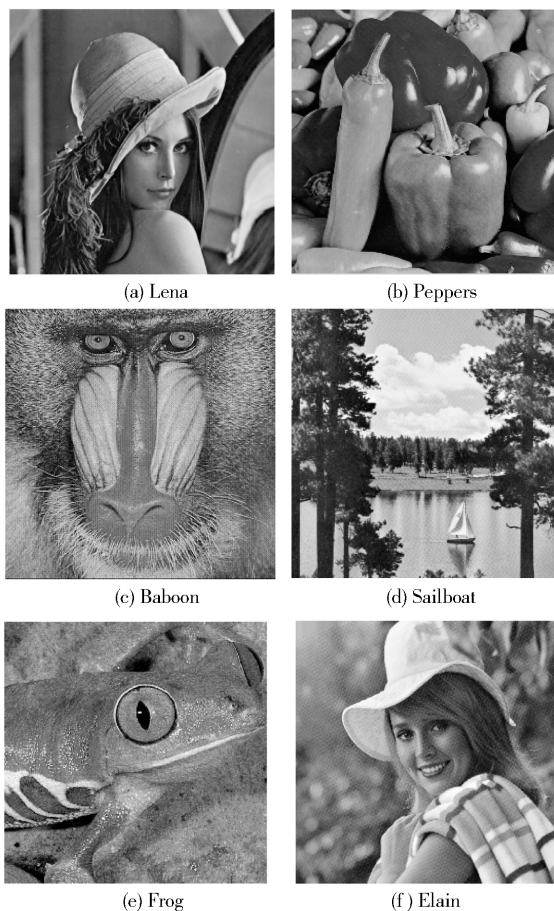


图1 原始图像

表 1 不同图像零水印间的相似度

相似度	Lena	Peppers	Baboon	Sailboat	Frog	Elain
Lena	1.000 0	0.523 4	0.527 3	0.476 6	0.468 8	0.492 2
Peppers	0.523 4	1.000 0	0.472 7	0.492 2	0.546 9	0.554 7
Baboon	0.527 3	0.472 7	1.000 0	0.511 7	0.543 0	0.464 8
Sailboat	0.476 6	0.492 2	0.511 7	1.000 0	0.515 6	0.492 2
Frog	0.468 8	0.546 9	0.543 0	0.515 6	1.000 0	0.523 4
Elain	0.492 2	0.554 7	0.464 8	0.492 2	0.523 4	1.000 0

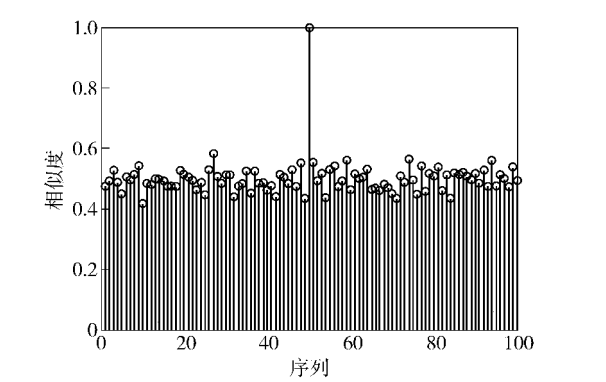


图 2 Lena 图像零水印与均匀分布随机序列间的相似度

4 实验结果

用原始鲁棒零水印与提取的鲁棒零水印间的相似度  $s$  衡量抵抗攻击的鲁棒性.

1) 添加高斯噪声

对原始图像添加高斯噪声,噪声方差、原始图像与攻击图像间的峰值信噪比 (PSNR)、2 个水印间的相似度如表 2 所示.

表 2 添加高斯噪声

原始图像	$s$ /PSNR	
	噪声方差为 0.005	噪声方差为 0.01
Lena	0.976 6/23.043 6	0.984 4/20.087 6
Peppers	0.980 5/23.211 0	0.972 7/20.302 1
Baboon	0.984 4/23.024 3	0.976 6/20.089 7

2) 添加椒盐噪声

对原始图像添加椒盐噪声,实验结果如表 3 所示.

表 3 添加椒盐噪声

原始图像	$s$ /PSNR	
	噪声强度为 0.02	噪声强度为 0.03
Lena	0.976 6/22.340 9	0.945 3/20.564 7
Peppers	0.972 7/22.027 6	0.976 6/20.227 4
Baboon	0.980 5/22.367 0	0.964 8/20.669 5

3) 中值滤波

对原始图像进行中值滤波,实验结果如表 4 所示.

表 4 中值滤波

原始图像	$s$ /PSNR	
	窗口大小为 $3 \times 3$	窗口大小为 $5 \times 5$
Lena	0.996 1/35.111 0	0.988 3/30.908 9
Peppers	0.996 1/34.121 0	0.996 1/31.244 5
Baboon	0.980 5/22.845 2	0.957 0/20.422 4

4) 高斯低通滤波

对原始图像进行标准差为 0.5 的高斯低通滤波,实验结果如表 5 所示.

表 5 高斯低通滤波

原始图像	$s$ /PSNR	
	窗口大小为 $2 \times 2$	窗口大小为 $3 \times 3$
Lena	0.941 4/29.458 7	0.976 6/40.244 5
Peppers	0.964 8/28.362 3	0.988 3/38.881 1
Baboon	0.980 5/22.566 7	0.992 2/30.779 7

5) JPEG 压缩

对原始图像进行 JPEG 压缩,实验结果如图 3 所示.

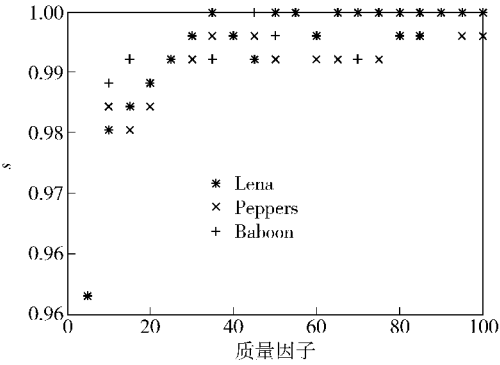


图 3 相似度与 JPEG 质量因子关系

6) 剪切

对原始图像进行剪切,实验结果如表 6 所示.

表 6 剪切

原始图像	$s$ /PSNR	
	剪切面积为左上角 $1/16$	剪切面积为左上角 $1/8$
Lena	0.976 6/17.842 8	0.933 6/14.397 9
Peppers	0.964 8/18.155 6	0.929 7/16.006 0
Baboon	0.968 8/16.984 0	0.933 6/14.854 0

7) 偏移行列攻击

对原始图像进行偏移行列攻击. 向右偏移列指整个图像右移后, 左边几列补全黑, 最后几列移出丢失. 向下偏移行指整个图像下移后, 上面几行补全黑, 最后几行移出丢失. 实验结果如表 7 所示.

表 7 偏移行列攻击

原始 图像	s/PSNR		
	向右偏移 2 列	向下偏移 2 行	先向右偏移 2 列 再向下偏移 2 行
Lena	0. 925 8/21. 992 8	0. 937 5/23. 659 3	0. 875 0/20. 361 5
Peppers	0. 925 8/22. 010 7	0. 918 0/22. 434 0	0. 882 8/19. 806 1
Baboon	0. 941 4/17. 062 1	0. 957 0/15. 918 6	0. 886 7/15. 566 2

8) 中间随机删除行列攻击

对原始图像进行中间随机删除行列攻击. 中间随机删除列指从被删除列的右边第 1 列开始逐列向左移动, 空余列补全黑. 中间随机删除行指从被删除行的下边第 1 行开始逐行向上移动, 空余行补全黑. 实验结果如表 8 所示.

表 8 中间随机删除行列攻击

原始 图像	s/PSNR		
	中间随机 删除 2 列	中间随机 删除 2 行	先中间随机删除 2 列再中间随机 删除 2 行
Lena	0. 937 5/23. 970 1	0. 972 7/24. 998 4	0. 921 9/21. 588 1
Peppers	0. 949 2/23. 660 4	0. 957 0/23. 673 9	0. 929 7/21. 242 0
Baboon	0. 957 0/19. 595 0	0. 980 5/19. 600 0	0. 945 3/17. 580 8

9) 尺寸缩放

对原始图像进行 3 种尺寸缩放攻击, 一是将原始图像的上下左右边框各几行置全黑; 二是将原始图像先缩小到 0. 8 倍再放大到 1. 25 倍, 从而恢复到原始大小; 三是将原始图像先缩小到 0. 5 倍再放大到 2 倍, 从而恢复到原始大小. 实验结果如表 9 所示.

表 9 尺寸缩放攻击

原始 图像	s/PSNR		
	图像上下左右 边框各 3 行置全黑	先缩小到 0. 8 倍 再放大到 1. 25 倍	先缩小到 0. 5 倍 再放大到 2 倍
Lena	0. 902 3/22. 057 5	0. 937 5/25. 713 5	0. 964 8/27. 967 9
Peppers	0. 953 1/21. 748 8	0. 964 8/24. 904 3	0. 968 8/25. 978 4
Baboon	0. 914 1/21. 621 5	0. 949 2/19. 855 2	0. 972 7/19. 489 3

10) 旋转攻击

对原始图像进行旋转攻击. 实验结果如表 10 所示.

表 10 旋转攻击

原始图像	s/PSNR	
	逆时针旋转 0. 5°	逆时针旋转 1°
Lena	0. 937 5/24. 727 9	0. 914 1/20. 915 7
Peppers	0. 925 8/23. 203 1	0. 875 0/19. 544 9
Baboon	0. 960 9/17. 024 5	0. 921 9/16. 120 3

从表 2 ~ 10 和图 3 可以看出, 零水印技术对不同纹理图像 Lena、Peppers 和 Baboon 都具有很强的鲁棒性. 总之, 相比于其他鲁棒水印技术<sup>[1-6]</sup>, 本文提出的零水印技术具有更强的鲁棒性.

5 结束语

利用 DWT 低频子带的能量聚集效应和奇异值的稳定性, 提出一种具有强鲁棒性的零水印技术. 该零水印技术没有对原始载体图像做任何改变, 拥有良好的不可见性. 实验结果表明, 该零水印技术对各种攻击具备很强的鲁棒性.

参考文献:

[1] Lahouari G, Ahmed B, Mohammad K I, et al. Digital image watermarking using balanced multiwavelets[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2006, 54(4): 1519-1536.

[2] Tsai M J, Hung H Y. DCT and DWT-based image watermarking by using subsampling[C] // ICDCSW '04. Hachioji: [s. n.], 2004: 184-189.

[3] Sharkas M, ElShafie D, Hamdy N. A dual digital-image watermarking technique [C] // WEC '05. Istanbul: [s. n.], 2005: 136-139.

[4] 温泉, 孙铁锋, 王树勋. 零水印的概念与应用[J]. 电子学报, 2003, 31(2): 214-216.

Wen Quan, Sun Tanfeng, Wang Shuxun. Concept and application of zero-watermark[J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(2): 214-216.

[5] 黄达人, 刘九芬. 小波变换域图像水印嵌入对策和算法[J]. 软件学报, 2002, 13(7): 1290-1297.

Huang Daren, Liu Jiufen. An embedding strategy and algorithm for image watermarking in DWT domain[J]. Journal of Software, 2002, 13(7): 1290-1297.

[6] 刘瑞祯, 谭铁牛. 基于奇异值分解的数字图像水印算法[J]. 电子学报, 2001, 29(2): 168-171.

Liu Ruizhen, Tan Tieniu. SVD based digital watermarking method[J]. Acta Electronica Sinica, 2001, 29(2): 168-171.