

基于奇异值分解的数字水印改进方案

张遂生, 袁正道

(郑州师范高等专科学校 物理系, 河南 郑州 450044)

[摘要] 提出了奇异值分解算法的改进方案. 结合人类视觉模型给出了盲水印算法嵌入水印强度的上界, 并确定了在不同水印强度下抗攻击能力的界限. 利用奇异值分解在保证图像质量无失真的条件下嵌入高强度水印, 并利用 Turbo 码的强纠错能力抵抗攻击和提取水印. 试验表明本方案在 JPEG 压缩、剪切、中值滤波、随机噪声和椒盐噪声等常见攻击下都能表现出良好的鲁棒性.

[关键词] 数字水印, 平稳小波变换, 奇异值分解, Turbo 编码, 人类视觉模型

[中图分类号] TP 37 [文献标识码] A [文章编号] 1672-1292(2008) 04-0147-04

Improved Scheme of Watermarking Based on Singular-Value Decomposition

Zhang Suisheng Yuan Zhengdao

(Department of Physics, Zhengzhou Teachers College, Zhengzhou 450044, China)

Abstract An improved scheme of singular-value decomposition algorithm is presented. Combined with human vision system (HVS), the upper boundary of embedded strength in blind watermarking algorithm is given, and the boundary of anti-attack ability in different watermarking strength is determined. High strength watermark is embedded in by using singular value decomposition, while ensuring the image quality. At last use the high error-correcting performance of Turbo code to anti-attack and extract watermark. Experimental result shows that the scheme is robust with the traditional attacks include JPEG compression, cropping, mean filter, random noise and pepper and salt noise.

Key words watermark, stationary wavelet transform, singular value decomposition, Turbo coding, human vision system

水印的有效性是指能否有效提取水印, 它必须在作品受到攻击后依旧存在. 在实际应用中, 正确估计不同的水印经常受到的攻击, 同时根据这些攻击正确选择水印技术并有效控制水印的稳健性是水印技术中非常重要的问题. 针对要预防的攻击, 若能够确定可抗攻击的能力, 则可以根据抗攻击能力要求设计和嵌入水印.

目前, 由于奇异值分解水印算法的稳健性和易操作性, 许多工作者对其进行了研究^[1]. 在文献 [2] 中, 作者采用了奇异值分解算法来嵌入水印在抵抗 JPEG 压缩方面卓有成效. 但由于嵌入强度不能够自适应确定, 而且含水印图像的分块效应明显, 导致水印鲁棒性差而受到极大限制. 针对分块效应带来的负面影响, 本文提出了平稳小波与纠错码相结合的改进算法. 文中算法充分利用了平稳小波的冗余特性和平移不变性, 结合小波系数能够体现 HVS (人眼视觉系统)^[3]的特点, 最大强度的嵌入水印而不破坏水印的不可见性. 在此基础上, 引入冗余信道的纠错编码思想, 将 Turbo 码和平稳小波有效结合, 实现信源信道的联合编码, 实验结果表明, 此方法有效地增强了水印的抗攻击能力.

1 水印编码

水印编码属于信源编码范畴, 有效的编码可以增强信息安全性和信息的抗干扰特性. 因此, 为了保证水印的安全性和有效性, 须对水印进行必要的加密和纠错编码操作.

水印编码的流程见图 1 原始水印图像 W_{b1} 进行压缩得到 W_{b2} , 再混沌调制得到 W_{b3} , 经过 Turbo 码编码后得到待嵌入的水印信息 W_T .

收稿日期: 2008-06-18

通讯联系人: 张遂生, 副教授, 研究方向: 编码技术. E-mail 064228067013@suda.edu.cn



图 1 水印编码流程图

Fig.1 Watermark coding flow chart

文中采用基于小波变换的 SPHT 压缩编码^[4]方法,此算法将用 8 bit 表示的灰度图像压缩为 1 bit 表示的二进制码流.混沌调制采用 Logistic 混沌序列. W_{b3} 经 Turbo 编码增强水印抗噪声性能.

为了描述算法的需要,定义映射 $f(0) = 1, f(1) = -1$; 定义乘积运算 \otimes . 设矢量 $a = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$, $b = \{b_1, b_2, \dots, b_n\}$, 则有

$$a \otimes b = \{a_1 b_1, a_2 b_2, \dots, a_n b_n\}. \tag{1}$$

当 a_i 和 b_i 为 $\{1, -1\}$ 时, 容易证明

$$a_i \times b_i \times b_i = a_i \tag{2}$$

$$a_i \times a_i \times b_i = b_i \tag{3}$$

由此可以扩展为 a, b 序列的乘积:

$$a \otimes b \otimes b = a. \tag{4}$$

如果 a 为明文, \otimes 为加密运算, 则 b 为加密序列. 解密时只需对密文以式 (4) 与加密序列相乘得到明文.

加密算法:

- (1) 先将待加密的二值图像 I 拉直成一个向量 V , 并利用 Logistic 映射作用于该向量得到 $V2$
- (2) 选取初始值密钥 $X0, u$, 利用 Logistic 映射计算公式计算出混沌序列并按序排列成矢量 P .
- (3) $V2 \otimes P = D$.
- (4) 将 D 向量转变为与 V 同样大小的矩阵, 即为密文.

解密过程: 输入相同的密钥再做一遍加密算法.

2 水印嵌入算法

2.1 奇异值分解

在矩阵论中奇异值分解 (SVD)^[5] 是一种将矩阵对角化的算法, 从线性代数角度看, 一幅灰度图像可以看作一个非负矩阵. 若一幅图像用 A 表示, 则矩阵 A 的奇异值分解定义为 $A = USV^T$. 其中正交矩阵 $U = [u_1, u_2, \dots, u_n] \in \mathbf{R}^{m \times n}$, $V = [v_1, v_2, \dots, v_n] \in \mathbf{R}^{m \times n}$, 对角阵 $S = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n) \in \mathbf{R}^{n \times n} = U^T A V$. 在图像处理中应用 SVD 的主要理论背景^[4] 是:

- (1) 图像奇异值的稳定性非常好, 即当图像被施加小的扰动时, 图像的奇异值不会有大的变化, 这一点正说明了在奇异值中嵌入水印必然会有不错的鲁棒性;
- (2) 奇异值所表现的是图像的内蕴特性而非视觉特性; 这一点说明了改变奇异值不会产生大的视觉变化, 这为不可见性提供了保障. 经过大量的实验表明, 最大奇异值在经受过一般攻击后变化不大, 因此本文的算法正是通过对最大奇异值量化处理来进行水印嵌入.

2.2 嵌入算法

- (1) 将原载体图 I (大小为 $M \times N$) 按 $p \times q$ 大小分块, 则载体图像所能嵌入的最大水印信息容量为 $M/p \times N/q$ 比特.
- (2) 对每一块子图像进行 3 级小波分解, 成为一个逼近子图 (LL) 和多个细节子图, 取出逼近子图进行 SVD 分解, 并获取最大奇异值.
- (3) 按下面规则对最大奇异值进行量化:

设水印图像像素值用 w 表示, r 表示分块最大奇异值, s 表示水印嵌入强度, 则

$$w = 1 \begin{cases} r = r - \text{mod}(r, s) + 3 \times s/4 \text{ mod}(r, s) \geq s/4 \\ r = r - \text{mod}((r - s/4), s) + s/4 \text{ mod}(r, s) < s/4 \end{cases} \tag{5}$$

$$w = 0 \begin{cases} r = r - \text{mod}(r, s) + s/4 \text{ mod}(r, s) \leq 3 \times s/4 \\ r = r - \text{mod}((r - s/2), s) + 5 \times s/4 \text{ mod}(r, s) > 3 \times s/4 \end{cases} \tag{6}$$

2.3 水印嵌入和提取流程

根据文献[3]提出的水印嵌入算法, 对其进行了改进. 为了保证水印图像具有一定的鲁棒性, 由临界刚可见差异值确定水印嵌入强度的上限. 图 2为基于提升小波变换的图像水印自适应嵌入算法:

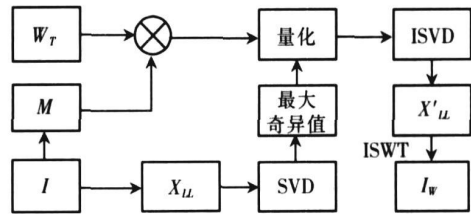


图 2 水印嵌入流程图

Fig.2 The flowchart of embedding watermark

- 嵌入过程的具体步骤为:
- (1) 载体图像视觉掩盖特征值模板生成: 借助 HVS掩蔽特性和视觉掩盖效应方法的基本思想, 从视觉模型导出视觉阈值, 目的在于嵌入水印时, 避免使载体图像明显失真.
 - (2) 对载体图像进行 3 级平稳小波变换, 并取出低频部分 X_{LL} .
 - (3) 对低频部分进行分块奇异值分解, 并求出各分块的最大奇异值 S_k .
 - (4) 最大奇异值量化嵌入水印. 人眼对低频非常敏感, 但鲁棒性强. 利用临界可见门限值 (JND) 确保最大强度的嵌入水印而不破坏不可见性.
 - (5) X'_{LL} 与其余自带结合进行平稳小波的反变换得到含水印空域图像 I_w .
- 水印的提取过程为嵌入的逆过程, 首先将含水印图像 I_w 变换在平稳小波域并进行分块奇异值分解得到 W_T , 经 Turbo 码译码、混沌解密并进行解压缩后得到提取水印 W .

3 实验结果

本实验采用 “lena” 512×512 灰度图像为载体图像, 16×16 “苏” 字样为水印图像. 在 M atlab 环境下完成程序仿真, 平稳小波函数采用常见的 Daubechies 小波, 进行 3 层分解. 仿真图像效果如图 3 所示, 生成的含水印图像中没有明显失真, 提取出的水印清晰完整.

为了测试所提出水印算法的性能, 分别依据评价标准 PSNR (峰值信噪比) 和 NC (归一化相关系数) [5] 针对 JPEG 压缩、滤波等攻击条件下的鲁棒性进行比较.

3 种算法为 Turbo-SWT、SWT 和 SVD 算法, 分别表示基于 Turbo 编码、平稳小波和奇异值分解 3 种算法. 图 4 图 5 为上述 3 种算法的性能比较. PSNR = 100 表明提取的水印误码率为 0

攻击方法分别为低通滤波、中值滤波、剪切、JPEG 压缩 (质量因子分别为 10Q、8Q、5Q、3Q、2Q、10)、椒盐噪声 0.01、高斯白噪声 (方差分别为 0.001、0.01、0.02) 攻击.

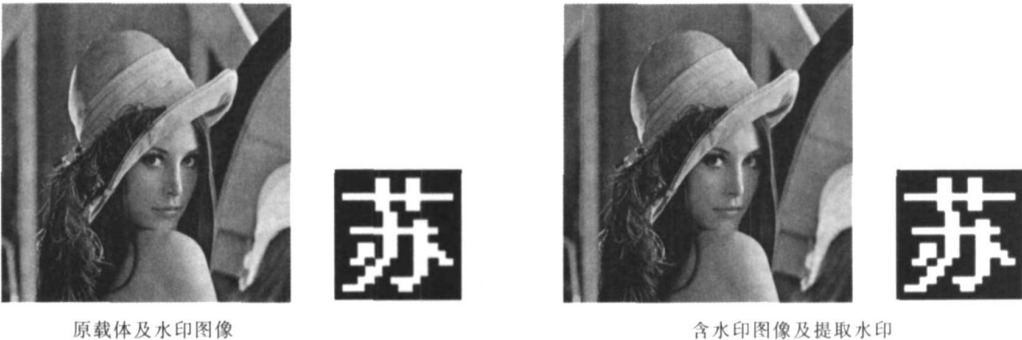


图 3 改进后水印算法的主观评价

Fig.3 Subjective evaluation of improved watermarking algorithm

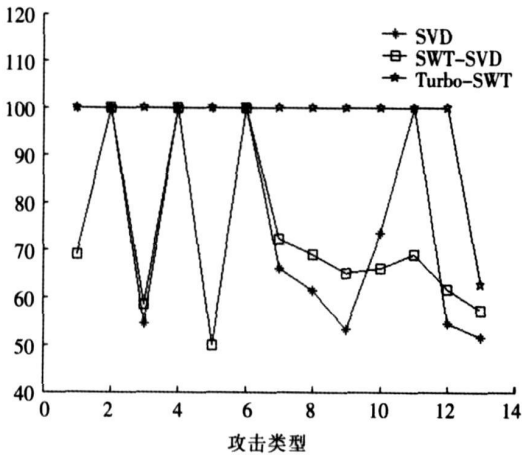


图 4 不同算法的 PSNR 比较

Fig.4 The comparison of PSNR with different algorithm

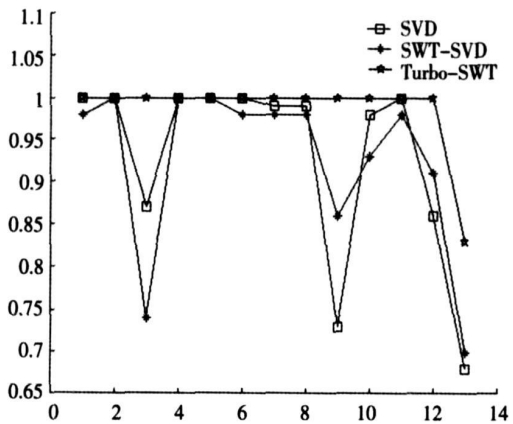


图 5 不同算法的 NC 比较

Fig.5 The comparison of NC with different algorithm

4 结论

大量的实验结果表明,人类视觉模型与平稳小波的有效结合可以有效提高水印嵌入强度.水印嵌入过程保证在不可见性条件下嵌入最大强度水印.同时,利用 Turbo 码水印系统联合以增强纠错性能.仿真结果显示,改进后的算法在抵抗常见的波形攻击具有很好的鲁棒性.

[参考文献] (References)

[1] Hyva A. A family of fixed-point algorithms for independent component analysis[J]. IEEE, 1997, 4 : 3 917-3 920

[2] Juha Kavanen, Jan Eriksson Adaptive score functions for maximum likelihood ICA[J]. Journal of VLSI Signal Processing System, 2002, 32(1/2): 83-92

[3] 刘永生, 张建伟, 陈希. 基于矢量量化的多用途数字水印算法[J]. 微计算机信息, 2008, 24(6): 52-55
Liu Yongsheng Zhang Jianwei Chen Xi A multipurpose image watermarking algorithm base on vector quantization in DWT domain[J]. Microcomputer Information, 2008, 24(6): 52-55. (in Chinese)

[4] 刘瑞祯, 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.
Liu Ruizhen Tan Tieniu SVD based digital watermarking method[J]. Electronic Journal, 2001, 29(2): 168-171. (in Chinese)

[5] 张春田, 张静. 图像工程 数字图像压缩编码[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006 : 156
Zhang Chuntian Zhang Jing Digital Image Compression Coding[M]. Beijing Tsinghua University Press 2006 : 156 (in Chinese)

[责任编辑: 丁蓉]