

文章编号:1001-9081(2006)09-2150-03

一种新颖的自适应水印算法

李又良^{1,2}, 李泽平³, 周建存¹

- (1. 贵州大学 理学院, 贵州 贵阳 550025;
2. 湖南城市学院 数学与计算机科学系 湖南 益阳 413000;
3. 电子科技大学 计算机科学与工程学院, 四川 成都 610054)
(stoneman119@163.com)

摘 要:目前有很多基于离散小波变换(DWT)的水印算法,但结合分形编码技术的很少。提出并实现了一种新的自适应水印算法。该方法能利用人眼视觉特性和分形误差,自适应控制水印的嵌入位置,能有效地改善水印图像的视觉质量;同时,也提高了水印系统的安全性。在低分辨率图像中嵌入水印,该方法效果较佳。实验结果表明,使用该方法嵌入的水印具有较好的不可感知性和鲁棒性,同时保证了较低的正向错误率。

关键词:数字水印;小波变换;人眼视觉系统;分形编码

中图分类号:TP309.7 **文献标识码:**A

Adaptive digital watermarking algorithm

LI You-liang^{1,2}, LI Ze-ping³, ZHOU Jian-chun¹

- (1. College of Science, Guizhou University, Guiyang Guizhou 550025, China;
2. Department of Mathematics and Computer, Hunan City University, Yiyang Hunan 413000, China;
3. College of Computer Science and Engineering,
University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu Sichuan 610054, China)

Abstract: Currently, there are many DWT(Discrete Wavelet Transform) based watermarking algorithms, but few of them discuss the issue in association with fractal image coding in wavelet domain. A new algorithm proposed by us can adaptively select locality to insert digital watermark to get better quality for image with watermarking and enhance the security of watermarking system, according to the characteristics of HVS(Human Visual System) and fractal image coding error. This algorithm performs well especially in low-resolution picture. The experimental results show that the algorithm makes watermark better invisible and robust, and keeps lower positive error ratio as well.

Key words: digital watermarking; wavelet transform; HVS(Human Visual System); fractal image coding

0 引言

作为知识产权保护的重要手段,数字水印技术一经提出就迅速成为信息安全领域一个新的研究热点。数字水印本质上是一个隐藏在数字化图像、视频和音频等多媒体中的信息,水印和内容集成在一起,不需要额外的存储空间和新的存储格式,可以实现版权保护、拷贝限制、使用跟踪和数据鉴定等功能。数字水印一般应具备安全性、不可感知性和鲁棒性。其中不可感知性和鲁棒性是对水印的最基本要求,而影响不可感知性和鲁棒性的因素主要是水印的嵌入和检测策略。

目前,变换域的水印算法是我们研究的主流,它主要包括离散傅里叶变换(DFT)、离散余弦变换(DCT)、离散小波变换(DWT)等。由于离散小波变换与JPEG2000压缩标准兼容,具有良好的能量压缩能力,而且在小波变换域内的图像处理可以充分利用人眼的视觉系统特性(HVS),从而利用小波变换来嵌入水印具有很好的研究和应用价值。一幅图像经过小波变换后,其相同方向但不同分辨率的子带图像具有较强的相似性,这种相似结构正好与分形编码的特点存在互补性。

如果将小波与分形有机地结合起来,不仅能大幅度地提高图像编码的压缩比,而且可以产生更加有效的分形水印算法^[1,2]。

文献[1]的水印算法把水印嵌入在小波系数的对角方向以及水平、垂直方向的前100棵系数树。该方法有如下不足:(1)在小波系数的水平、垂直方向嵌入位置固定,水印嵌入算法安全性不够,嵌入水印容易受到破坏;(2)没有考虑分形误差,小波系数的对角方向某些系数树的分形误差较大,嵌入水印后,图像的突变部分会产生失真。本文改进了文献[1]的算法,充分利用人眼视觉模型的JND阈值自适应控制水印在小波系数水平、垂直方向的嵌入位置;由分形误差调节水印在对角方向的嵌入量。改善了水印图像的视觉质量,提高了水印系统的安全性。

本文算法具有如下特点:(1)利用人眼视觉特性和分形误差的自适应嵌入策略,控制水印的嵌入位置,能较好地折中了鲁棒性和不可感知性,同时提高了水印系统的安全性;(2)利用了同方向各子带和各小波树之间的相似性,不但缩短了分形编码时搜索匹配的时间,而且水印的嵌入和提取比较简

收稿日期:2006-03-17; 修订日期:2006-05-29 基金项目:贵州省科学技术基金资助项目(黔基合计字(2003)3069号)

作者简介:李又良(1971-),男,湖南益阳人,讲师,硕士研究生,主要研究方向:数字水印、计算机网络; 李泽平(1964-),男,贵州人,副教授,博士研究生,主要研究方向:数字水印、计算机系统结构; 周建存(1978-),男,湖南宁乡人,硕士研究生,主要研究方向:计算机网络技术。

单; (3) 根据分形参数恢复水印信息, 实现了低正向误差率的盲检测, 增加了实用性。

1 小波变换系数、人眼视觉特性及分形编码

1.1 图像小波变换系数树

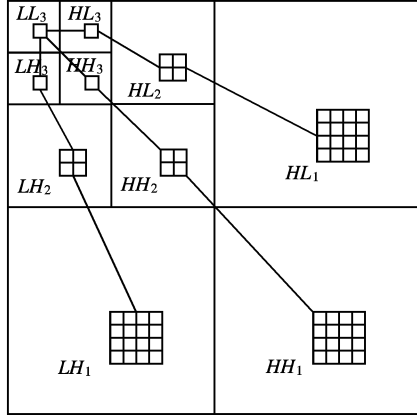


图1 三个尺度小波变换系数的树结构

假设对一幅 $N \times N$ 的图像作 n 个尺度的小波分解, LL_n 为低频分量, $HL_i, LH_i, HH_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 分别为水平、垂直、和对角高频分量 (如图1), 则 LL_n 是图像的一个低尺度逼近, $HL_i, LH_i, HH_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 分别表示了图像中水平、垂直和对角方向的边缘和纹理等, 小波系数中各个子带中的系数的空间位置具有对应关系, 它们构成树状结构, 对通过上一级系数的地址来对下一级系数进行寻址。图1就是三个尺度小波变换系数的树结构图的例子。设 $d \in \{HL, LH, HH\}$, p_l, q_l 为 l 级子带系数的带内坐标 ($p_l, q_l \in \{0, 1, \dots, N/2^l - 1\}$), 则具体的树结构为:

$$\begin{aligned} tree(LL_n(p_n, q_n)) &= \bigcup_{\substack{d \in \{HL, LH, HH\} \\ l}} (d_n(p_n, q_n)) \\ tree(d_l(p_l, q_l)) &= \bigcup_{i=0} \bigcup_{j=0} tree(d_{l-1}(2p_l + i, 2q_l + j)) \end{aligned}$$

其中 $l = n, n-1, \dots, 2$ 。对 $N \times N$ 图像作 n 个尺度的小波分解可产生 $N^2/2^{2n}$ 棵树, 每棵树有 4^n 个节点, 对应原图像的一个 $2^n \times 2^n$ 像素块, 其中树根 $LL_n(p_n, q_n)$ 是该像素块的像素平均值, 其他节点反映该像素块的像素在不同精度级下的水平、垂直和对角差值信息。

1.2 人眼视觉特性

人眼具有如下视觉特性 HVS: (1) 人眼对高频和对角方向的子带内的噪声不敏感; (2) 在图像高亮度区域, 人眼对噪声不敏感; (3) 对图像纹理和边缘区域的噪声不敏感。为了更好的刻画 HVS, 下面给出小波变换中的临界可见误差门限 JND 的计算方法^[3]。假设已对原始图像 $I_{M \times N}$ 进行 L 级小波变换 (设 $L = 4$), 则小波变换的临界可见误差门限为 $T(l, \theta, x, y)$, 其中, l 表示小波分解层数, θ 表示高频子带的方向, (x, y) 表示小波系数位置。

$$T(1, \theta, x, y) = \lambda(l, \theta) \Lambda(l, x, y) \Xi(l, x, y) \quad (1)$$

其中:

表示频率掩蔽的

$$\lambda(l, \theta) = \begin{cases} 1.00, & l = 1 \\ \sqrt{2}, \theta = HH & 0.32, & l = 2 \\ 1, \theta = LH, HL & 0.16, & l = 3 \\ & 0.1, & l = 4 \end{cases}$$

表示亮度掩蔽的

$$\Lambda(l, x, y) = \frac{1}{256} I_4^L \left(1 + \frac{x}{2^{4-l}}, 1 + \frac{y}{2^{4-l}} \right)$$

表示纹理掩蔽的

$$\Xi(l, x, y) = \sum_{k=0}^{4-l} \frac{1}{16^k} * \sum_{\theta \in \{HH, HL, LH\}} \sum_{i=0}^l \sum_{j=0}^l \left[I \left(j + \frac{x}{2^k}, i + \frac{y}{2^k} \right) \right]^2 + \frac{1}{16^{4-l}} \text{Var} \left[I_4^L \left(1 + j + \frac{x}{2^{4-l}}, 1 + i + \frac{y}{2^{4-l}} \right) \right]$$

其中 $i, j = 0, 1$ 。

1.3 图像的分形编码原理

目前, 图像的分形编码大多采用 Jacquin 提出的局部迭代函数系统^[4], 其编码过程如下:

(1) 将原始图像分成 R 块集合和 D 块集合, R 块大小为 $2^i \times 2^i$, 且互不重叠, D 块大小为 $2^{i+1} \times 2^{i+1}$, 它们之间允许有部分重叠。

(2) 根据 LIFS 拼贴定理, 对每个 R 块 R_i , 寻找合适的仿射变换 w_i 及 D 块 D_j , 使 $w_i(D_j)$ 与 R_i 的距离尽可能接近, 距离最小的 D_j 块称为 R_i 的最佳分形匹配块。通常仿射变换用一个等价的组合变换来代替, 即 $w_i = G_i \circ \tau_i \circ \phi_i$, 其中 G_i 为灰度处理算子, 包括比例因子 p 和灰度补偿因子 g , τ_i 为对折或旋转变换, 总共有 8 种可能, ϕ_i 是收缩变换。距离通常取两集合中各对应元素差的均方和。

(3) 存储 D_j 块的位置, G_i, τ_i 和 ϕ_i 等分形参数, 完成对 R_i 的编码, 集合 R 中所有块被编码后即完成对原图像的分形编码。原图像的恢复可通过对任意图像的有限次迭代变换得到。本文利用分形参数的不变性实现了数字水印的嵌入和提取。

2 基于分形的小波域水印算法

2.1 水印嵌入

本文利用图像同方向子带和各小波树之间的相似性, 水印的嵌入步骤如下:

(1) 水印生成。假定嵌入信息是代表版权的在意义的文本或图像, 并能映象成二值序列。本文采用服从正态分布的高斯序列, 转化为二值序列 $\{-1, 1\}$, 扩频后用混沌序列置乱加密, 生成水印序列 $W = \{a_1, \dots, a_L\}$ 。

(2) 对原始图像进行 n 层小波分解, 最低分辨率层的细节部分是分形预测的基础, 采用无失真编码。

(3) 对小波系数构造互不相交的图像树集合, 每一棵图像树 $R = (R_{n-1}, R_{n-2}, \dots, R_1)$, 不包含最低分辨率层的逼近子图和细节子图。对图像树 $R = (R_{n-1}, R_{n-2}, \dots, R_1)$ 的每一子块 R_i 在其同方向上一级子带块中寻找 R_i 的最佳分形匹配块, 并拓展成 R_i 的一棵相似树 $D = \{D_n, D_{n-1}, \dots, D_2\}$, 故每棵图像树 R 有 $n-1$ 棵相似树 $D^{(1)}, \dots, D^{(n-1)}$, 每棵相似树的位置可记为 D 树在最低分辨率层中细节子带中块 D_n 的起始坐标。图像树和相似树如图2。

(4) 对每棵图像树 R 选取与其距离最小的两棵树 (称为最优匹配树和次优匹配树), 其分形编码作为 R 树的分形编码。其与 R 树的距离为分形误差。

(5) 用公式(1) 计算小波系数最低分辨率层细节子带中各像素点的临界可见误差门限 JND 作为下一级子带中每棵图像树 R 的 JND 阈值。

(6) 对所有图像树的 JND 值和最优匹配树的分形误差排

序。分形误差调节因子 α 自适应调节对角方向嵌入水印的图像树；在水平和垂直方向由小波系数树的 JND 值确定剩余水印位的嵌入位置。对角方向嵌入水印有更强的鲁棒性，通过误差调节因子，能够折中水印的不可见性和鲁棒性。

(7) 对每一棵要嵌入水印的图像树 R 嵌入水印。若水印位为 1，则由其最优匹配树的分形编码参数解码该图像树，否则， R 树中中频子带的块用次优匹配树的分形编码参数解码。

(8) 对解码图像进行小波逆变换，得到嵌有水印的图像。

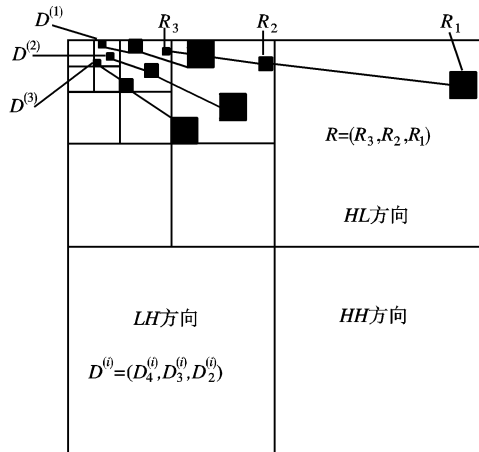


图2 四层小波分解的图像树和相似树

2.2 水印的提取与检测

水印的提取过程在对水印图像的小波分形编码中完成。根据水印嵌入位置，对嵌有水印的小波系数树 R ，求其所有相似子树，若它们为同一相似树，则嵌入的水印位 $\alpha_i' = 1$ ，否则为 -1 。提取水印 W' 和原始水印 W 的相似性用(2)式度量：

$$\text{Sim}(W', W) = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \alpha_i' \alpha_i, \quad L \text{ 为水印长度} \quad (2)$$

根据正向错误率 $P_{fp} = \sum_{m=[n(T+1)/2]}^n \binom{n}{m} \cdot 0.5^n$ ，选定检测阈

值 T ，若 $\text{Sim}(W', W) \geq T$ ，则认为存在水印。

3 实验结果

本文在 Matlab6.1 平台上作了仿真实验。实验图像 fl6.tif 分辨率为 512×512 ，嵌入水印长度为 1224bit。

(1) 本文方法 ($\alpha = 0.9$) 文献[1] 方法所得到的水印图像分别如图3、图4。显然本方法的不可见性优于文献[1]。

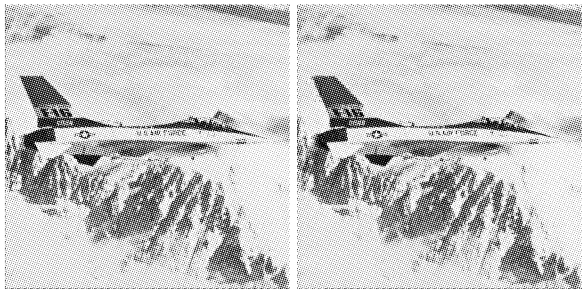


图3 本文方法 (PSNR = 35.7) 图4 文献[1]的方法 (PSNR = 30.6)

(2) 实验中验证了：在对角方向嵌入水印其鲁棒性更强，分形误差调节因子 $\alpha \in (0, 1)$ 调节了水印在对角方向的嵌入量，实验证明 $\alpha = 0.9$ 时水印图像的不可见性和鲁棒性达到最佳。

(3) 实验中生成水印不作扩频处理，对水印图像用 StirMark4.0 攻击后的检测结果，检测阈值到 0.1，其正向错误

率为 5.67×10^{-5} ，表1 对本文方法与文献[1] 方法作了对比。本文方法的鲁棒性比原方法略低，但仍可检测到。

表1 对水印图像作各种攻击后的检测结果对比

攻击方法		相似度	
		文献[1]方法	本文方法
JPEG压缩	品质因子90	0.62	0.56
	品质因子50	0.20	0.12
高斯噪声	方差20	0.22	0.15
中值滤波	3×3	0.29	0.13
逆时针旋转	-1度	0.15	0.16
StirMark弯曲		0.17	0.13

4 结语

利用了同方向各子带和各小波树之间的相似性，创造性引入分形编码技术，实现了一种新颖的数字水印嵌入方法。使用人眼视觉模型和分形误差自适应控制水印的嵌入位置，能有效改善水印图像的视觉质量，提高了水印系统的安全性，折中了鲁棒性与不可见性之间的矛盾。实验结果表明：该方法不但实现简单，检测精度高，而且水印具有较好的不可感知性和鲁棒性，是一种行之有效的数字水印嵌入、提取与检测技术。

参考文献：

- [1] 石磊, 耿红琴, 洪帆, 等. 一种基于分形编码的小波域自适应水印[J]. 小型微型计算机系统, 2004, 25(12): 2254-2257.
- [2] LI Y, DU SD. Research on Wavelet Domain Fractal Coding in Digital Watermarking[A]. Multimedia and Expo, 2005. ICME 2005 [C]. IEEE International Conference, 2005. 61-64.
- [3] LEWIS AS, KOWLES G. Image compression using the 2-D wavelet transform[J]. IEEE Transaction on Image Progressing, 1992, 2(1): 244-250.
- [4] JAACAUIN AE. A novel fractal block-coding technique for digital images[A]. ICASSP[C], 1990. 2225-2228.

欢迎订阅《计算机应用》

《计算机应用》现已成为我国计算机领域较有影响的重要学术技术期刊，是国内计算技术类中文核心期刊、中国科学引文数据库 (CSCD)、中国科技论文统计源期刊数据库 (CSTPC)、中国学术期刊综合评价数据库、中国数字化期刊群全文数据库等国内重要机构的检索源期刊。本刊影响因子逐年提升，目前已达到 0.627，总引频次为 1491。

多年来，本刊多次被评为全国优秀科技期刊，获全国优秀科技期刊一等奖，两次荣获国家期刊奖提名奖，是计算机学科期刊中少有的获奖期刊。

本刊以漂亮的封面设计，特色鲜明的高质量文章，以应用技术为主，内容丰富。满足广大从事计算机应用基础、应用工程、应用软件、应用系统的研究、开发工作者、学者、大专院校师生需要，是拓宽应用领域、启迪开发思路、撰写学位论文等的重要参考工具。

全国各地邮局均可订阅 (也可直接与编辑部联系)。

邮发代号: 62-110 定价: 18.5 元/册 全年 222 元

邮局汇款: 成都市 237 信箱《计算机应用》编辑部

邮政编码: 610041

联系人: 周永培

电话: (028) 85224283-602 传真: (028) 85222239

E-mail: hjb@computerapplications.com.cn