

# 一种基于重要系数小波树的数字水印算法

于帅珍

(安徽财经大学 信息工程学院, 安徽 蚌埠 233041)

**摘 要:** 现有的基于小波变换的算法大多将水印嵌入在各个方向的中频或高频中, 水印的稳定性差。文中提出一种基于重要系数小波树的数字水印算法, 利用小波零树思想和人眼视觉的掩蔽特性, 在彩色图像的蓝色分量小波域中构造重要系数树, 然后将加密后的水印信息一部分嵌入到低频重要系数中, 一部分嵌入到中频重要系数中。实验结果表明: 该算法不仅具有较好的不可见性, 并且对常见的图像处理操作具有较强的鲁棒性。

**关键词:** 重要系数树; 小波零树; 离散小波变换; 彩色图像

**中图分类号:** TP309.7

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-629X(2008)11-0152-04

## Digital Watermark Algorithm Based on Significant Wavelet Tree

YU Shuai-zhen

(School of Information Engineering, Anhui University of Finance & Economics, Bengbu 233041, China)

**Abstract:** Most of the DWT methods embed watermark in all directions in the middle or high frequency, the robust has poor stability. In this paper, a new watermark algorithm for color images based on significant wavelet tree is proposed. Using the idea of wavelet zero-tree and masking peculiarity of human visual system, significant wavelet trees are constructed in blue components of color image of wavelet domain, then part of scrambled watermark are embedded into significant lowest frequency coefficients and the other are embedded into the significant middle frequency coefficients. Experimental results show that the proposed algorithm not only has good invisibility, but have strong robust to common image manipulations.

**Key words:** significant wavelet tree; wavelet zero-tree; DWT; color images

## 0 引言

目前, 现有的数字图像水印算法主要分为两大类: 空域法和变换域法。与空域法相比, 变换域法具有诸多优点, 因此, 变换域的水印算法是人们研究的主流, 它主要包括离散傅里叶变换法、离散余弦变换法、小波变换法等。由于离散小波变换与 JPEG2000 压缩标准兼容, 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充分利用人眼的视觉系统(HVS)特性, 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<sup>[1,2]</sup>。

Shapiro<sup>[3]</sup>提出的著名的嵌入零树小波算法(EZW, Embedded Zerotree Wavelet), 将跨带相关性与“零”值编码概念有效地结合起来, 是一种强有力的图像压缩的算法。

文中提出的算法吸收了零树小波编码的重要思

想, 将水印信息嵌入到小波树结构的重要系数中, 具有很好的抗攻击能力。

## 1 基本原理

### 1.1 图像多分辨率分解

对于一幅  $N \times N$  的图像进行三级小波变换, 将产生如图 1 所示的三个高频带系列和一个低频带。根据图像的小波分解特性, 低频带  $LL_3$  为小波分解的最大

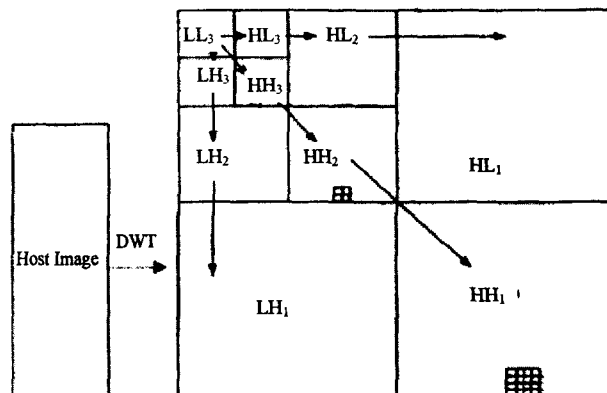


图1 图像小波分解图

收稿日期: 2008-02-16

基金项目: 2008 年度安徽省自然科学基金项目(KJ2008B090)

作者简介: 于帅珍(1968-), 女, 山东烟台人, 讲师, 硕士, 研究方向为信息监测与信息处理、数字水印。

尺度、最小分辨率下对原始图像的最佳逼近,图像的绝大部分能量集中在这个低频带。高频带是图像不同尺度、不同分辨率下的细节信息。小波分解的级数越大,分辨率越低,其中的图像小波分解系数越重要,反之,越不重要。对同一级分解图像,低频子图像最重要,其次是水平细节、垂直细节、对角线细节。小波图像子带按其重要性总体的排序为:LL<sub>3</sub>,HL<sub>3</sub>,LH<sub>3</sub>,HH<sub>3</sub>,HL<sub>2</sub>,LH<sub>2</sub>,HH<sub>2</sub>,HL<sub>1</sub>,LH<sub>1</sub>,HH<sub>1</sub>。

## 1.2 小波树

图像小波变换后的小波系数可以按图 1 所示的形式分成小波系数树。每一棵树的树根是低频子带中的一个系数,共有  $\frac{N^2}{64}$  棵小波树,如果将每一级小波分解的每个子带中同一棵树上的节点系数看成一个子带,假设树根节点为  $(m, n)$ ,那么第三级小波分解中每个子带的块大小是 1,节点为  $(m, n)$ ;第二级小波分解中每个子带的块包含  $2 \times 2$  个节点  $(2m-2+i, 2n-2+j)$  ( $i=1,2; j=1,2$ );第一级小波分解中每个子带的块中有  $4 \times 4$  个节点  $(4m-4+i, 4n-4+j)$  ( $i=1,2,3,4; j=1,2,3,4$ ),每一棵树共有 64 个小波系数,每棵小波树的不同小波块系数在同方向上都具有相似性和固定的对应关系。

在小波变换中,人们常使用零树和重要树(Qualified Significant Wavelet Tree, QSWT)<sup>[4]</sup>,零树是 Shapiro 在 1993 年的嵌入零树小波编码中首次提出的,一个小波系数如果在粗分辨率下关于给定的门限  $T$  是不重要的,而且它所对应的所有子系数关于门限  $T$  也是不重要的,则称这些小波系数形成了一棵零树;重要树主要用于确定小波系数中的重要系数,一个小波系数如果关于给定的门限  $T_1$  是重要的,而且它所对应的所有子系数关于门限  $T_2$  也是重要的 ( $T_1 > T_2$ ),则称这些小波系数构成重要系数小波树,即重要树。

## 1.3 水印嵌入位置的选择

Innoss<sup>[5]</sup>将水印信息嵌入到小波零树结构的非重要系数中,得到的含水图像具有很好的隐蔽性,但其稳定性很差,因为这些区域小波系数的值较小,水印信息嵌入的强度较低,在对图像进行处理攻击后水印容易丢失或变化很大,水印鲁棒性差。

Cox<sup>[6]</sup>等人提出,水印信息应该放在视觉系统感觉最重要的分量上,但 Cox 等人把 DC 系数排除在外,原因在于避免含水图像的图像出现方块效应。但是经过实验发现,如果在小波域的低频部分嵌入一部分水印信息,含水图像的图像并不会出现方块效应,而且会使鲁棒性大大提高。

文中吸取了嵌入零树小波编码的思想和小波变换的特点,提出了一种基于重要系数小波树的水印算法。利用人眼视觉系统作掩蔽,对彩色图像中人眼最不敏感的蓝色分量<sup>[7]</sup>进行三级小波分解,然后将水印信息一部分嵌入到低频重要系数中,一部分嵌入到中频重要系数树中,这样,既能保证水印对各种攻击的鲁棒性,又能保证它的隐蔽性。

## 2 水印的嵌入与提取

### 2.1 水印的嵌入算法

假设原始宿主图像的大小为  $512 \times 512$ ,二值水印图像的大小为  $32 \times 32$ ,则水印嵌入算法可大致描述如下:

(1)从原始彩色图像中抽取蓝色分量,将抽取的蓝色分量进行三级小波分解得到 10 个子带。其中子带 LL<sub>3</sub>,HL<sub>3</sub>,LH<sub>3</sub>,HH<sub>3</sub> 被选择为水印的嵌入区域,而子带 HL<sub>2</sub>,LH<sub>2</sub>,HH<sub>2</sub> 为可选区域(实验证明,在该区域内嵌入水印,对图像的质量影响不大,但其鲁棒性却明显增强)。

(2)加密算法。根据 Logistic 映射公式  $X_{n+1} = 1 - uX_n^2$ ,以  $u$  和  $X_0$  作为密钥生成一个二值混沌序列,并以此来调制原始水印图像;然后将加密后的水印图像扫描成一维,并将其中的 0 变为 -1,1 保持不变。由于混沌序列对初始值极其敏感,在不知道密钥的情况下,盗版者即使提取水印信号也无法恢复出水印图像。

(3)将低频部分分成  $4 \times 4$  的 256 块,在每个块内选择最大的两个系数,然后利用水印信号的前半部分像素对这些系数进行修改,其嵌入公式如下:

$$d'_3{}^0(i, j) = d_3{}^0(i, j) + \alpha_1 * W(k)$$

其中,  $d_3{}^0(i, j)$ 、 $d'_3{}^0(i, j)$  分别为水印嵌入前、后低频重要系数,而  $W(k)$  为水印信息,  $\alpha_1$  为强度因子。

(4)对于中频,首先利用查找法找出重要系数,然后再将水印信息的后半部分像素嵌入。

查找算法如下:

$$\begin{aligned} & \text{if } |d_3{}^0(i, j)| \geq T_1 \\ & \text{if } |d_2{}^0(2*i-1, 2*j-1)| \geq T_2 \text{ and } |d_2{}^0(2*i-1, 2*j)| \geq T_2 \\ & \text{and } |d_2{}^0(2*i, 2*j-1)| \geq T_2 \text{ and } |d_2{}^0(2*i, 2*j)| \geq T_2 \\ & \text{then } s[k] = \{d_3{}^0(i, j)\}; \\ & p[k] = \{\max(d_2{}^0(2*i-1, 2*j-1), d_2{}^0(2*i-1, 2*j), d_2{}^0(2*i, 2*j-1), d_2{}^0(2*i, 2*j))\} \end{aligned}$$

其中,  $d_3{}^0(i, j)$  ( $\theta=1,2,3$  分别表示水平、垂直和对角线三个方向)表示第三层的小波系数,  $d_2{}^0(i, j)$

表示第二层的小波系数,  $s[k]$  为第三层重要小波系数,  $p[k]$  为  $s[k]$  的子节点中的重要小波系数,  $T_1, T_2$  为自适应阈值。从  $s[k], p[k]$  中各选 512 个最大系数, 将水印嵌入其中。

水印嵌入算法如下:

$$d'_3{}^\theta(i, j) = d_3{}^\theta(i, j) + \alpha_2 W(k)$$

$$d'_2{}^\theta(i, j) = d_2{}^\theta(i, j) + \alpha_3 W(k)$$

其中,  $d_3{}^\theta(i, j) \in s[k], d_2{}^\theta(i, j) \in p[k], d'_3{}^\theta(i, j), d'_2{}^\theta(i, j)$  分别是其嵌入水印后的重要系数,  $\alpha_2, \alpha_3$  为不同子带的自适应水印嵌入强度, 一般情况下,  $\alpha_2 > \alpha_3$ 。由于在中频部分采用了冗余嵌入, 即在  $d_3{}^\theta(i, j)$  部分嵌入的水印信息在  $d_2{}^\theta(i, j)$  中再嵌入一次, 水印的鲁棒性进一步得到了提高。

(5) 保存水印的嵌入位置, 用全部小波系数进行三级小波逆变换得到嵌入水印后的蓝色分量图像。

(6) 得到嵌入水印后的彩色图像。

## 2.2 水印的提取算法

(1) 从嵌入水印的彩色图像和原始彩色图像中分别抽取蓝色分量, 将提取的蓝色分量分别进行三级小波分解。

$$d = \text{DWT}(b)$$

$$d' = \text{DWT}(b')$$

(2) 提取低频和中频的水印信息。

低频部分水印信息:

$$W^0 = (d'_3{}^0 - d_3{}^0) / \alpha_1$$

中频部分水印信息:

$$W^1 = [(d'_3{}^1 - d_3{}^1) / \alpha_2 + (d'_2{}^1 - d_2{}^1) / \alpha_3] / 2$$

$$W^2 = [(d'_3{}^2 - d_3{}^2) / \alpha_2 + (d'_2{}^2 - d_2{}^2) / \alpha_3] / 2$$

$$W^3 = [(d'_3{}^3 - d_3{}^3) / \alpha_2 + (d'_2{}^3 - d_2{}^3) / \alpha_3] / 2$$

提取的水印信息:

$$W = W^0 + W^1 + W^2 + W^3$$

(3) 解密算法。首先将水印序列中的 -1 变为 0, 然后输入相同的密钥再做一遍水印加密算法, 得到水印图像  $W'$ , 其大小为  $M \times M$ 。

(4) 为了消除观测者的经验、身体条件、实验条件和设备等主、客观因素的影响, 需要采用归一化相似度 (NC) 对提取的水印和原始水印的相似性进行定量的评价, 其定义为:

$$NC = \frac{1}{N_w} \sum_{i=1}^{N_w} \overline{W(i) \oplus W'(i)}$$

$N_w$  为水印总长度,  $\oplus$  表示异或,  $W$  为原始水印,  $W'$  为提取的水印,  $0 \leq NC \leq 1$ , 若 NC 的值超过 0.8, 则判定彩色图像中存在此二维数字水印, 若 NC 为 1, 表明提取的水印图像和原水印图像完全相同。

## 3 实验结果

为了测试本算法的性能, 对  $512 \times 512 \times 24$  位真彩 Lena 图像进行了水印的嵌入实验, 水印采用  $32 \times 32$  的二值图像, 在 Matlab6.5 和 Windows XP 平台上进行仿真实验。

### 3.1 检测性能测试

图 2(a)、(c) 分别是原始图像和嵌入水印后的图像, 人眼感觉不到二者的差异, 具有较好的主观质量。经计算, 含水印图像的峰值信噪比  $\text{PSNR} = 42.18\text{dB}$ , 具有较好的客观质量。图 2(b)、(d) 分别是原始水印和提取的水印, 经过计算, 提取的水印和原始水印的归一化相似度  $\text{NC} = 1$ , 客观上说明二者完全相同, 主观上也感觉不到二者的差异。

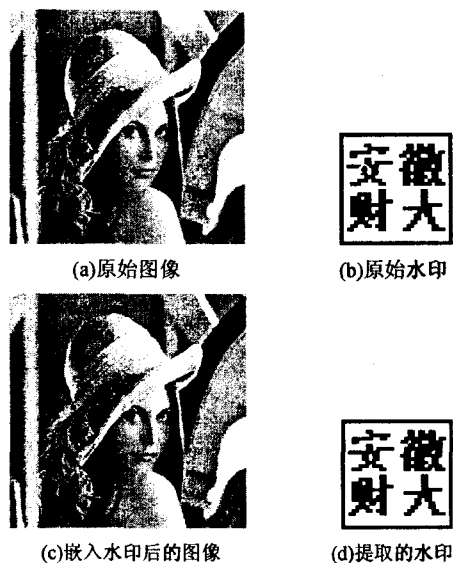


图 2 水印的嵌入与提取

### 3.2 抗攻击能力测试

为了检验该算法的鲁棒性, 下面对含水印的图像进行抗攻击能力测试, 其具体测试数据如表 1 所示。

## 4 结束语

提出的基于重要小波树的数字水印算法, 克服了以往的将水印信息嵌入到宿主图像的中频或高频的思想, 利用小波零树编码算法和人眼视觉系统的掩蔽性, 根据小波各层的不同情况, 选择不同的嵌入强度, 将一部分经混沌置乱后的水印信息嵌入到蓝色分量的低频重要系数中, 一部分嵌入到蓝色分量的中频重要系数中, 并且在中频部分采用了冗余嵌入, 水印的嵌入强度较大, 因而该算法既保证了水印具有良好的不可见性和安全性, 又增强了水印的鲁棒性。本算法不仅具有较强的抵抗 JPEG 压缩、噪声攻击、滤波处理、锐化处理、马赛克效应等常见的噪声处理和攻击的能力, 也有

较强的抵抗图像缩放攻击和一定的剪切攻击等几何攻击的能力,尤其是抗 JPEG 攻击的能力很强,能够完全抵御 JPEG 攻击,具有较好的实用性。

表 1 对嵌入水印后的图像进行几种常见的攻击后的检测结果

攻击方法		PSNR(dB)	NC
JPEG 压缩	保持品质因子 90	39.76	1
	保持品质因子 60	34.52	1
	保持品质因子 50	32.60	0.99
	保持品质因子 30	29.54	0.93
	保持品质因子 10	24.68	0.85
加噪声	强度为 0.01 的高斯噪声	23.38	0.98
	强度为 0.01 的乘性噪声	30.17	1
	强度为 0.01 的椒盐噪声	28.71	1
	强度为 0.05 的椒盐噪声	20.88	0.83
平滑滤波	均值滤波	25.7662	1
	中值滤波	30.65	1
	高斯低通滤波	35.89	1
	维纳滤波	34.08	1
图像缩放	缩小 4 倍	30.54	1
马赛克效果	2×2 块	29.16	1
	3×3 块	26.77	0.94
锐化	锐化	31.25	1
剪切	左上剪去 1/4	14.27	0.86

(上接第 148 页)

快速提取、模式算法改进,力争开发出基于协议分析的通用入侵检测系统。

参考文献:

[1] 杜建国. 协议分析和命令解析在入侵检测中的应用[J]. 计算机工程与应用, 2004(18): 2-3.  
[2] Postel J. Internet Protocol DARPA Internet Program Protocol Specification [S/OL]. 1981. <http://www.ietf.org/rfc/>

(上接第 151 页)

[6] Lee A. A Data Mining Framework for Constructing Features and Models for Intrusion Detection System[D]. USA: Columbia University, 1999.  
[7] Kumar S, Spafford E H. An Application of Patter Matching in Intrusion Detection[R]. USA: Department of Computer Science, Purdue University, 1994.  
[8] Doak J. Intrusion Detection: The Application of a Feature Selection - A Comparison of Algorithms and the Application of Wide Area Network Analyzer[R]. USA: Department of Computer Science, University of California, 1992.  
[9] Lee W, Stroifo S J. Data mining approaches for intrusion de-

参考文献:

[1] Lee Chang - hsing, Lee Yeuan - Kuen. An adaptive digital image watermarking technique for copyright protection[J]. IEEE Trans on Consumer Electronics, 1999, 45(4): 1005 - 1015.  
[2] Podilchuk C I, Zeng W. Image - adaptive watermarking using visual models[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1998, 16(4): 525 - 539.  
[3] Shapiro J M. Embedded image coding using zerotrees of wavelet coefficients[J]. IEEE Trans Singal Processing, 1993 (41): 3445 - 3462.  
[4] Ntalian K S, Doulam A D, Doulam N D. An automatic scheme for stereoscopic video object based watermarking using qualified significant wavelet trees[J]. Image Processing, 2002(3): 501 - 504.  
[5] Innous H, Miyazaki A, Yamamoto A, et al. A digital watermark based on the wavelet transform and its robustness on image compression[C]// Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing, ICIP'98. Chicago, USA: [s. n. ], 1998.  
[6] Cox I, Kilian J, Leighton T, et al. Secure spread spectrum watermarking for multimedia[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(12): 1673 - 1687.  
[7] 孙圣和, 陆哲明, 牛夏牧, 等. 数字水印技术及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2004.

rfc0791.txt? number = 791.  
[3] Postel J. Transmission Control Protocol DARPA Internet Program Protocol Specification[S/OL]. 1981. <http://www.ietf.org/rfc/rfc0793.txt? number = 793>.  
[4] 刘文涛. 网络安全开发包详解[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.  
[5] 田伟. 基于协议分析的网络入侵检测系统研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2007.  
tection[C]//Proc of the 7th USENIX Security Symposium. San Antonio, TX: [s. n. ], 1998.  
[10] Joshi M, Karypis G. A Universal Formulation of Sequential Patterns[R]. USA: Department of Computer Science, University of Minnesota, 1999.  
[11] Bace R G. Intrusion Detection[M]. USA: Macmillan Technical Publishing, 1999.  
[12] Mannila H, Toivonen H. Discovering generalized episode using minimal occurrences [C]//Proc. of the 2nd Intl. Conf. on Knowledge Discovery in Database and Data Mining. Portland, Oregon: [s. n. ], 1996.