

# 一种 DT-CWT 域内的图像零水印算法

李 段<sup>1)</sup> 徐 刚<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>(燕山大学信息科学与工程学院, 秦皇岛 066004) <sup>2)</sup>(燕山大学网络中心, 秦皇岛 066004)

**摘 要** 为了实现数字图像的版权保护, 基于双树复小波变换, 提出了一种新的零水印算法。该算法由于不改变图像的任何信息, 因此在兼具不可见性和鲁棒性的同时, 还可以解决常规的冗余变换域水印算法的能量损失问题。该算法先借用实小波变换的零树结构思想, 在变换后图像中选择重要的系数树, 并利用主分量分析提取它们的第一主分量, 然后经过量化编码构造零水印信息, 再到认证中心注册后, 即可作为用户的版权标志。实验结果表明, 该算法不仅具有很好的鲁棒性, 而且可以抵抗滤波、加噪、有损压缩等各种攻击。

**关键词** 双树复小波变换 小波零树 主分量分析 零水印

中图法分类号: TP309 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2006)05-0725-05

## An Image Zero-watermarking Algorithm in DT-CWT Domain

LI Duan<sup>1)</sup>, XU Gang<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>(Information Science and Engineering College, Yanshan University, Qinhuangdao 066004)

<sup>2)</sup>(Network Center, Yanshan University, Qinhuangdao 066004)

**Abstract** To achieve the copyright protection of digital image, we present a novel zero-watermarking algorithm based on DT-CWT(dual-tree complex wavelet transform). The algorithm doesn't modify any information of the image, therefore it possesses both the invisibility and robustness, while it can resolve the loss of energy of conventional watermarking algorithms based on redundant transform. Exploiting the idea of real wavelet zerotree structure, we choose the vital-coefficient-trees from the transformed image, then by using PCA(principal component analysis), extract the first principal components, quantize and encode them to construct the zero-watermark signal, which is registered to the center of authentication and is used to identify user's copyright later. Experiments show, that the robustness of the algorithm is very good, and it can resist various attacks such as filtering, noising, lossy compression, etc..

**Keywords** dual-tree complex wavelet transform(DT-CWT), Wavelet Zero-tree, principal component analysis(PCA), Zero-watermarking

## 1 引 言

数字水印作为保护多媒体信息的版权及其安全使用的一种手段, 已成为多媒体信息安全领域的一个研究热点。水印算法一般分为空间域方法和变换域方法两类, 其中变换域方法一般是对变换系数值进行某种操作, 不仅鲁棒性强, 而且安全性高, 其典型的变换包括离散傅里叶变换(discrete Fourier

transform, DFT)、离散余弦变换(discrete cosine transform, DCT)、离散小波变换(discrete wavelet transform, DWT)等。由于小波变换具有良好的时间频率局部特性、多分辨率分析特性, 因此在新一代图像压缩标准中得到广泛的应用, 同时也使得 DWT 域内的水印算法研究很广。

但是, 常规的 DWT 有不具有平移不变特性和方向选择特性两大缺陷, 这两点严重地影响了水印的鲁棒性和不可见性。文献[1]将冗余小波变换

收稿日期: 2005-03-16; 改回日期: 2005-06-04

第一作者简介: 李段(1980 ~ ), 女。现为燕山大学助教, 2005 年获燕山大学硕士学位。主要研究方向为图像处理、数字水印。E-mail: liduanbb@163.com

(redundant DWT, RDWT) 用于图像水印, 虽然 RDWT 具有平移不变特性, 但是仍然不能区分两个相反的对角线方向, 而且计算量也很大。文献[2]提出基于 DT-CWT<sup>[3]</sup>的水印算法, 其中 DT-CWT 也是一种冗余变换, 它不仅可以提供信号的超完备表示和便于确定信号的重要特征, 而且对抗压缩、噪声等攻击的鲁棒性更强<sup>[4]</sup>。但是, 由于冗余域算法不可避免地都存在水印信号的能量损失, 因此现有的算法都未能从根本上解决这一问题。

本文利用 DT-CWT 的特点, 结合实小波变换中成熟的小波零树理论, 提出一种用于图像版权保护的零水印算法。由于零水印过程不改变图像的任何信息, 仅通过提取其重要的特征来构造水印信号, 这样就不存在能量损失问题, 并且加水印图像和原图像相同, 因此可以很好地解决水印的不可见性和鲁棒性之间的矛盾<sup>[5]</sup>。

## 2 DT-CWT

DT-CWT 是 Nick Kingsbury 提出的<sup>[3]</sup>, 它应用于图像处理, 除了能保持小波变换的完美重建和计算方便特性外, 还兼有另外一些重要特性, 这些特性决定了应用 DT-CWT 水印算法的鲁棒性, 具体表现在以下几方面:

(1) DT-CWT 是一种冗余变换, 它是使用两棵实小波滤波器树来分别构造复小波的实部与虚部, 对于图像而言, 可提供 4:1 的冗余度, 而冗余变换则不仅可以提供图像的超完备表示, 而且便于确定图像的重要特征;

(2) 尽管每棵树的输出都经过下采样, 但由于在每一级重建时, 取两棵树之和就可以抑制混叠信号分量, 因此 DT-CWT 具有近似的平移不变特性;

(3) 由于该变换的滤波器响应不关于 0 对称, 故可以区分两个相反的对角线方向, 并具有良好的方向选择特性。图像经过每级分解后, 可得到 6 个复系数子带, 它们分别对应着  $\pm 15^\circ$ ,  $\pm 45^\circ$ ,  $\pm 75^\circ$  方向。

但是, 由于 DT-CWT 具有 4:1 的冗余度, 这对水印算法的设计有很大的影响, 即当对图像应用冗余变换时, 其反变换要涉及一个从多维变换空间到低维图像空间的映射, 该变换对水印算法设计有很大影响。例如, 由于 DT-CWT 提供 4:1 的冗余度, 故其反变换是一个从  $4N$  维变换空间到  $N$  维图像空间的

映射, 但在  $4N$  维空间中, 有一个  $N$  维列空间和一个与之正交的  $3N$  维零空间, 列空间内的变化可使得输出图像发生变化, 而零空间内的变化则不会使输出图像产生任何改变<sup>[2]</sup>, 也就是说, 对于任意产生的水印序列, DT-CWT 反变换时将有 75% 的能量损失掉, 这将严重影响水印的提取。

为了避开能量损失这一问题, 本文提出一种在 DT-CWT 域利用图像特征构造水印信息, 而不嵌入到图像中的零水印算法。由于零水印算法不改变图像的任何信息, 因此不仅可以保证能量不损失, 而且水印图像和原始图像相同, 这样就使水印系统达到鲁棒性和不可见性的统一。

## 3 算法介绍

本文算法的主要步骤如下: 首先将图像进行  $L$  级 DT-CWT 分解, 然后取幅度图像进行零水印信号的提取, 即利用实小波变换的零树结构思想, 先确定出重要系数树, 然后通过对这些树进行主分量分析来得到它们的第一主分量, 处理后便得到零水印。水印检测时, 先进行相同的处理, 然后将提取的水印信号与原水印信息进行相关运算, 即可判定水印的存在性。该算法水印构造和检测的框图如图 1 所示。

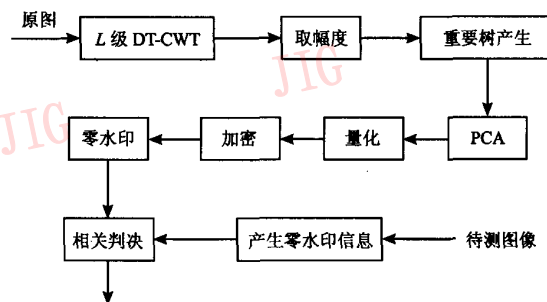


图 1 DT-CWT 域零水印的构造与检测

Fig. 1 The construction and detection of zero-watermarking in DT-CWT domain

### 3.1 小波树结构及零树思想

设一幅大小为  $N \times N$  的图像  $f$ , 对其进行  $L$  级小波分解, 可生成  $3L$  个细节子带和一个逼近子带。记分辨率为  $l$ 、方向为  $k$  的细节子带系数为  $f_l^{(k)}(m, n)$ , 其中,  $l=1, 2, \dots, L$  表示分辨率,  $k=h, v, d$  分别表示水平、垂直、对角方向,  $m, n \in [1, N/2^l]$ , 其逼近子带系数用  $f_l^*(m, n)$  表示,  $L$  为分解级数,  $a$  表示逼近子

带,  $m, n \in [1, N/2^L]$ 。图 2 给出了  $L=3$  时的小波分解结构图。

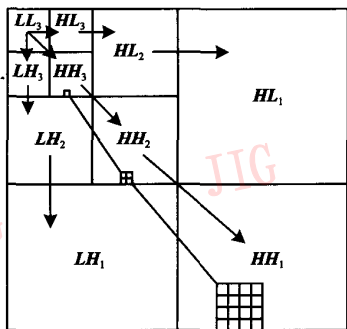


图 2 3 级小波分解结构图

Fig. 2 The diagram of 3-scale wavelet decomposition structure

小波树结构定义如下:

$$F(f_L^a(m, n)) = \bigcup_{k=h,v,d} F(f_L^k(m, n)) \quad (1)$$

$$F(f_l^k(m, n)) = \bigcup_{i=-1}^0 \bigcup_{j=-1}^0 F(f_{l-1}^k(2m+i, 2n+j))$$

$$l = 2, \dots, L-1, k = h, v, d \quad (2)$$

这样, 每一个低频系数  $f_L^a(m, n)$  就与其对应的同一空间位置的不同分辨率、不同方向子带内的高频系数构成一棵小波系数树。图 2 给出了一棵小波分解结构树。

小波零树是由 Shapiro 最早提出的<sup>[6]</sup>, 它假设如下: 对于一个预先给定的阈值  $T$ , 若一个小波系数小于  $T$ , 则认为它是不重要的小波系数, 它对应的子系数也认为是不重要的, 而仅包含不重要小波系数的树, 就是零树; 如果一个小波系数大于  $T$ , 则认为是重要系数, 它对应的子系数也是重要的, 这些小波系数就构成重要树。大量图像的实际统计数据表明, 此假设成立的概率在 95% 以上。

### 3.2 主分量分析

主分量分析是一种线性变换, 又称为离散的 K-L 变换, 通过此变换, 可从原有特征得到一组个数相同的新特征, 由于它们都是原有各特征的线性函数, 且其中的前几个即包含了原有特征的主要信息, 因此可达到既保留原有信息, 又减小特征个数, 即降低特征空间维数的目的。

本文利用主分量分析来计算重要小波树的第一主分量, 并将其作为图像的特征用于构造零水印信号, 同时用  $R_i (i = 1, 2, \dots, M)$  表示第  $i$  棵重要小波树, 并可将它们看作是某随机变量的多个样本。这些小波树的第一主分量计算如下: 计算重要小波树

矩阵  $R = [R_1, R_2, \dots, R_M]$  的协方差矩阵  $S = E(R \cdot R^T)$ , 与  $S$  的最大特征值对应的特征向量即是第一主分量方向  $D$ , 而小波树  $R_i$  的第一主分量则为

$$P_i = R_i^T \cdot D \quad (3)$$

### 3.3 零水印生成算法

设待保护的原始图像为  $f$ , 大小为  $N \times N$ , 其零水印的构造可分为以下 4 步:

(1) 通过对  $f$  进行  $L$  级 DT-CWT 分解来得到  $6L$  个细节子带和 2 个逼近子带。这些子带内的系数均为复系数, 为了便于计算, 可不考虑相位特征, 而仅用系数的幅度图来构造零水印信号。图 3 示出了 Lena 图像经过  $L=3$  级分解得到的幅度图像;



图 3 Lena 经 3 级 DT-CWT 的幅度图像

Fig. 3 The amplitude image of Lena after 3-scale DT-CWT

(2) 根据小波零树结构思想, 先通过在最低频的 6 个细节子带内设定阈值来选取重要系数, 若小波系数大于对应的阈值, 那么该系数就选为重要系数; 然后再考察其子系数是否也是重要系数, 若是, 则构成一棵重要树, 这样共选取  $M$  棵重要树, 记为  $R_i (i = 1, 2, \dots, M)$ 。因为最高频子带内的系数能量较小, 且容易改变, 故本文将这部分子带内系数排除在外;

(3) 先应用主分量分析来提取  $R_i (i = 1, 2, \dots, M)$  的第一主分量方向  $D$ , 再以步长  $\delta$  将其量化为  $\hat{D}$ , 即得到它们的第一主分量  $P_i (i = 1, 2, \dots, M)$ , 然后将其二值化

$$W_i = \begin{cases} 1 & \text{if } P_i > T \\ -1 & \text{if } P_i \leq T \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (4)$$

其中,  $T$  为阈值, 由此就产生了二值水印序列  $W$ ;

(4) 为增强算法的安全性, 对水印序列  $W$  进行加密处理。由密钥  $K$  生成一个长度为  $M$  的序列  $S$   $S(K) = \{s(i) \in [1, M], s(i) \neq s(j), i, j = 1, 2, \dots, M\}$

(5)

并用此序列中的元素作为  $W$  中元素的索引,产生的新序列为

$$\hat{W} = \{\hat{w}(i) = w(s(i)), i = 1, 2, \dots, M\} \quad (6)$$

$\hat{W}$  即为用密钥  $K$  置乱后的特征水印序列,然后将此信息保存,并到认证中心注册为用户水印,即可作为判定图像版权的依据。

需要说明的是,为了实现盲检测,选取的重要树的位置以及第一主分量方向需要保存,因为经过处理后的图像,重要系数可能发生改变,其计算出来的主分量方向也往往不同。

### 3.4 水印检测

假设可能经过攻击后的含水印图像为  $\tilde{f}$ , 水印提取过程可以分为以下 4 步:

(1) 对  $\tilde{f}$  进行  $L$  级 DT-CWT 分解,并计算其幅度图像;

(2) 根据阈值来得到  $M$  棵重要系数树,并记为  $\tilde{R}_i (i = 1, 2, \dots, M)$ ;

(3) 先将  $\tilde{R}_i (i = 1, 2, \dots, M)$  投影到  $\hat{D}$  上来得到  $\tilde{P}_i (i = 1, 2, \dots, M)$ ,再将其二值化来得到  $\tilde{W}_i (i = 1, 2, \dots, M)$ ;

(4) 将存储的水印信号  $\hat{W}$  用密钥  $K$  解密,即得到  $W$ ,然后与  $\tilde{W}$  取相关,相关值为

$$\rho = \frac{W \cdot \tilde{W}}{\sqrt{W \cdot W}} \quad (7)$$

取相关值阈值  $T_\rho$ ,若检测到的相关值大于  $T_\rho$ ,即认

为水印存在,否则水印不存在。

阈值  $T_\rho$  可以这样确定:首先随机产生 1 000 个  $M$  长度的二值序列,然后计算它们与原水印序列  $W$  的相关值,结果发现,相关值几乎都在  $(-4, 4)$  范围内。为了进一步折衷虚警概率和漏检概率,使它们均达到最小,可取  $T_\rho = 5$ 。

## 4 实验结果

为验证本文算法的效果,取  $512 \times 512$  大小的 256 级灰度图像 Lena 进行了实验。实验时,首先进行  $L=5$  级的 DT-CWT,第 1 级采用 9/7 双正交小波滤波器,之后各级均采用 Q-shift 6-tap set 滤波器,并将最低频 6 个细节子带的重要系数选择的阈值分别设为 280, 120, 100; 280, 105, 160; 然后进一步考察它们的子系数,如果 4 个子系数也较大,方选为重要系数树,共得到  $M=144$  棵重要树。

在未受任何攻击的情况下,计算得到的含水印图像与原始图像的相关值为 12。图 4(a) 给出了原始的 Lena 图像以及含水印图像未受攻击时相关检测的结果。图中横坐标代表 1 000 个随机水印序列,其中第 500 个为原水印序列,纵坐标为相关检测值。由图 4(a) 右图可见,在横坐标为 500 处的相关值明显高于其他检测值,由此可以判断水印存在。

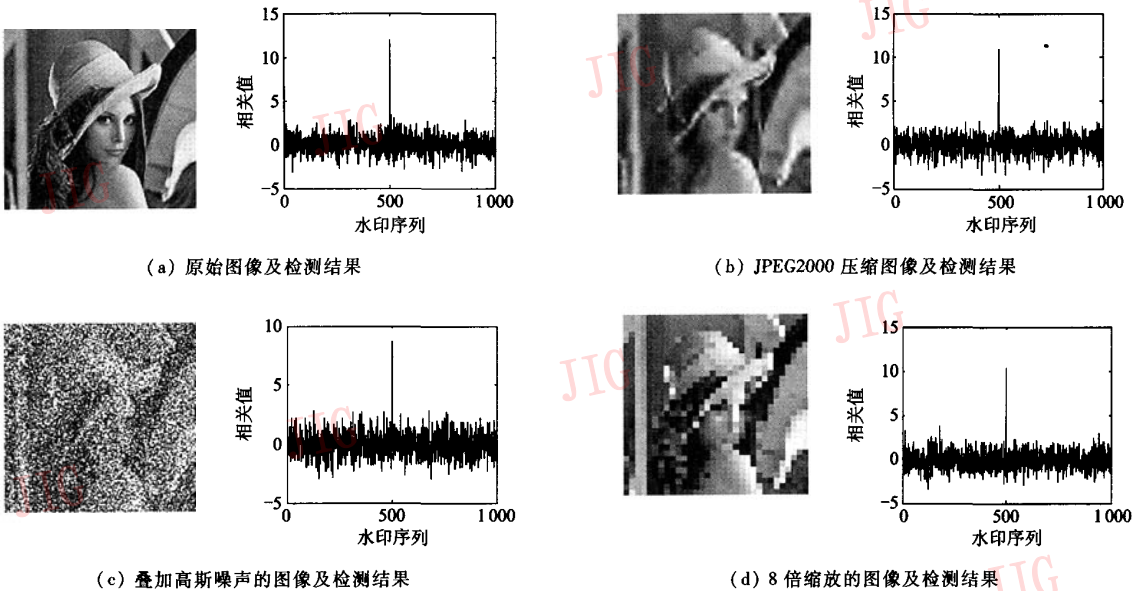


图 4 鲁棒实验结果

Fig. 4 Robustness Test Results

进行的鲁棒性实验如下:

**实验 1** 灰度值改变,即分别对图像进行  $8 \times 8$  均值滤波、 $8 \times 8$  中值滤波、 $8 \times 8$  维纳滤波、直方图均衡、参数为 0.5 的对比度增强、锐化等攻击后,得到的结果示于表 1 中。由表中数据可见,本算法可以成功地抵抗此类攻击。

表 1 灰度值改变的鲁棒性测试结果

Tab.1 Robustness Test Results of modifying grayscale value

攻击类型	相关值	攻击类型	相关值
$8 \times 8$ 中值滤波	11.3333	直方图均衡	11.6667
$8 \times 8$ 均值滤波	11	对比度增强	11.6667
$8 \times 8$ 维纳滤波	11.3333	锐化	12

**实验 2** 有损压缩,即分别对图像施加 JPEG2000 和 JPEG 压缩。当施加比特率大于 0.5 的 JPEG2000 或比特率大于 0.4 的 JPEG 压缩时,提取的水印信号与原水印完全相同,即检测相关值为 12。随着比特率值减小,检测相关值也逐渐变小,但变化幅度不大。施加比特率为 0.05 的 JPEG2000、比特率为 0.1 ( $Q=2$ ) 的 JPEG 压缩时,其得到的检测相关值分别为 11, 10.3333, 图 4(b) 示出了比特率为 0.05 的 JPEG2000 压缩后的图像及检测结果。

**实验 3** 噪声处理,即对图像叠加均值为 0, 方差为 40% 的高斯噪声,以及密度为 0.4 的椒盐噪声,其得到的检测相关值为 8.6667, 11, 图 4(c) 示出了叠加高斯噪声后的图像及检测结果。

**实验 4** 几何处理,即对图像施加缩放 8 倍、剪切掉左上角  $1/4$ 、旋转  $1^\circ$ 、 $5^\circ$  攻击,其得到的检测相关值分别为 10.3333, 10.6667, 11.3333, 6.6667, 图 4(d) 示出了缩放 8 倍后的图像及检测结果。

从以上实验结果可见,本算法可以对抗一般信号处理操作以及一些几何攻击,尤其是抵抗各种滤波、JPEG、JPEG2000 有损压缩及缩放攻击的性能很好,而现有的鲁棒水印算法则往往不能同时很好地抵抗这些攻击。

## 5 结 论

本文提出了一种在 DT-CWT 域内,利用小波零树结构和主分量分析的图像零水印算法。该算法在 DT-CWT 变换的幅度图像中,首先根据实小波的零树思想选取重要的系数树和提取其第一主分量,然后经过量化编码构造出零水印信号,再将其注册,即可作为用户的版权标志。

本算法采用零水印方案,不仅可以保证鲁棒性和不可见性的统一,还可以解决常规的冗余域水印方案中的信号能量损失问题。实验表明,本算法对抗各种攻击的鲁棒性很强,并可以对抗各种滤波、压缩、加噪以及一些几何攻击。

今后,将进一步地对 DT-CWT 域的水印算法进行研究,其中如何设计水印信号满足一定的形式,以避免能量损失将是一个主要的研究内容。

## 参考文献 (References)

- 1 CAO Jian-guo, Fowler J E, Younan N H. An image-adaptive watermark based on a redundant wavelet transform [A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing [C], Thessaloniki, Greece, 2001: 277 ~ 280.
- 2 Poo P. Digital watermarking using complex wavelet [D]. Cambridge University, Ph. D. Thesis, 2002: 43 ~ 130.
- 3 Kingsbury N. The dual-tree complex wavelet transform: A new efficient tool for image restoration and enhancement [A]. In: Proceedings of European Signal Processing Conference [C], Rhodes, Greece, 1998: 319 ~ 322.
- 4 Jost P, Vandergheynst P, Frossard P. Redundant image representation in security applications [EB/OL]. [http://lts1pc19.epfl.ch/repository/Jost2004\\_761.pdf](http://lts1pc19.epfl.ch/repository/Jost2004_761.pdf)
- 5 WEN Quan, SUN Yan-feng, WANG Shu-xun. Concept and application of zero-watermark [J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(2): 214 ~ 216. [温泉, 孙彦锋, 王树勋. 零水印的概念与应用 [J]. 电子学报, 2003, 31(2): 214 ~ 216.]
- 6 GUO Lei, GUO Bao-long, CHEN Long-tan. Wavelet zerotree-based watermarking algorithms for still images [J]. Journal of Xidian University, 2003, 30(5): 677 ~ 681. [郭磊, 郭宝龙, 陈龙谭. 基于小波零树结构的图像水印算法 [J]. 西安电子科技大学学报, 2003, 30(5): 677 ~ 681.]