

小波和余弦变换相结合的灰度图像水印算法

李智 陈孝威

(贵州大学计算机科学与工程学院, 贵阳 550025)

摘要 在充分考虑人类视觉系统掩蔽特性的基础上,首先给出基于图像分块的临界噪声阈值矩阵 JND (just noticeable difference),进而提出了一种结合离散小波变换(DWT)和离散余弦变换(DCT)域的采用灰度图像作为水印的具有较好鲁棒性的公开水印技术。实验结果表明,该算法对常见图像处理操作、有损压缩和裁剪、挤压、像素移位等几何变换有较好的鲁棒性,特别是信号增强操作处理几乎不影响水印的正确提取。

关键词 离散小波变换(DWT) 离散余弦变换(DCT) 行列奇偶校验编码 人类视觉系统 Hilbert 扫描

中图分类号: TP391 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2006)06-0834-06

Public Watermarking Algorithm of Gray-level Still Images Combining DWT and DCT

LI Zhi, CHEN Xiao-wei

(Computer Science Department, Guizhou University, Guiyang 550025)

Abstract This paper is based on taking the masking characteristics of the human visual system into account. First, we give the method that can calculate the just noticeable difference(JND) matrix. Secondly, we propose a public watermarking of gray-level still images combining DWT and DCT. The results of experiment indicate that this watermarking scheme is much robust against noise interference, some geometric distortions and commonly used image processing techniques, especially the signal enhanced processing almost can not affect the correct extraction of watermark.

Keywords discrete wavelet transform, discrete cosine transform, the coding of range supervised, human visual system, Hilbert scanning

1 引言

数字水印是实现数字作品版权保护的有效方法,它通过在原始数据中嵌入秘密信息(水印)来证实该作品的所有权。目前,绝大部分的数字水印技术考虑到加入信息量过大影响载体图像的视觉效果而只使用基于1维ID(identification)序列和2维二值数字水印技术来进行研究,这种水印所包含的知识产权的保护信息量少、保密性差,且多数商标或版权标志都是以灰度图像或彩色图像表示的,因此如何嵌入灰度水印图像的研究具有很重要的实用价值。但是以灰度图像为水印信号的数据量太大,难以嵌入。针对这种

情况,易开祥等人^[1]提出了一种以灰度图像为水印信息的数字水印系统,但是这种系统是在空域上完成的,被加载了水印信息的载体图像在经历攻击性实验时鲁棒性不高。这对该技术的应用产生一定的限制。牛夏牧等人^[2]提出了一种应用于DCT(离散余弦变换)域以灰度图像为水印信号的公有水印算法,但在该算法中,灰度水印信号只是被简单地进行位平面分解,并未考虑图像压缩技术,使得嵌入载体图像的数据量太大,无法在载体图像中添加多个水印本来增强水印的鲁棒性。通过对现有数字水印算法的研究^[3-5],并结合图像压缩技术和DWT(离散小波变换)进行图像处理的特点,本文提出了一种结合DCT和DWT具有较高鲁棒性的自适应公开

基金项目:国家教育部春晖计划项目(2004003)

收稿日期:2004-11-30;改回日期:2005-07-25

第一作者简介:李智(1977~),女,博士。主要研究方向为数字图像水印技术、多媒体技术。E-mail:chocolate_lizhi@hotmail.com

水印算法。利用静态图像压缩编码技术,将灰度数字水印编码为一个二值 ID 数字矩阵,并对数字矩阵进行行列奇偶校验编码,在 DWT 域内实现水印的嵌入。实验结果表明,该算法对常见图像处理操作、有损压缩和裁剪、挤压、像素移位等几何变换有较好的鲁棒性,特别是信号增强操作处理几乎不影响水印的正确提取,所以该算法是有效和实用的。

2 具有较高鲁棒性的自适应公开水印算法

2.1 离散小波变换和离散余弦变换

2.1.1 离散小波变换

小波变换基本思想就是对原图像进行细致的频率分离即多分辨率分解。如图 1、图 2 所示,通过小波变换,原图像被分解为 4 个子带图像:水平和垂直方向的低频子带图像 LL_1 ,水平方向的低频和垂直方向的高频子带图像 LH_1 ,水平方向的高频和垂直方向的低频子带图像 HL_1 ,水平和垂直方向的高频子带图像 HH_1 。若对低频子带 LL_1 再进行小波分解,又可得到更低分辨率的 4 个 2 级子带图像,如此反复可对图像进行多级小波分解。

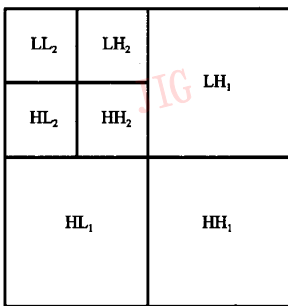


图 1 图像 DWT 分解模型

Fig.1 The decomposed model of image

其中,低频分量 LL_1 ,称之为近似子带,包含了原图像的绝大部分信息,是原图像的最佳逼近。中高频分量 LH,HL 和 HH 称之为细节子带,分别保持原始图像的垂直边缘细节、水平边缘细节和对角线边缘细节,它们刻画了原始图像的边缘、轮廓和纹理细节等特征。小波的近似子带所含数据量大,受外界影响小,稳定性好,是水印嵌入的理想区域,但是近似子带同时也集中了原图像的低频信息,这些信息是人眼视觉的敏感区域,对其直接进行水印信号

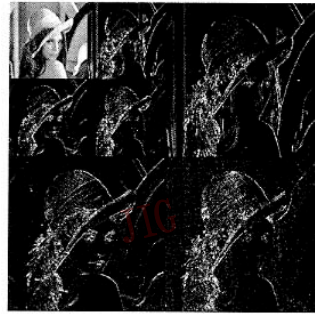


图 2 “Lena”经过两次小波变换

Fig.2 Example was changed in DWT

的嵌入会造成较严重的图像视觉效果破坏。而对细节子带虽然所含信息量不如近似子带丰富,但其中包含了原图像的纹理、轮廓和边缘等信息,并且人眼视觉对这些区域不敏感。因此在本算法中载体图像在经过小波变换后,将取载体图像经过小波变换后的中高频子带作为水印信息嵌入的区域,一方面能确保水印的鲁棒性,另一方面也有利于保持图像的边缘细节的完整性,减少由于水印的嵌入而引起的图像视觉质量下降。

2.1.2 DCT 域对水印图像预处理

采用 256 级灰度数字图像 (32×32) 作为数字水印,为了方便灰度数字水印的嵌入,必须将其变换编码为一系列二值 ID 数字,再将该 1 维的二值序列嵌入到原始载体图像中。利用 JPEG 的压缩编码原理,可以将灰度数字水印图像变换编码为 1 维的二值序列流的形式。首先,将灰度水印图像分割成互不覆盖的 8×8 分块,对每块进行 DCT 变换,然后用 JPEG 亮度量化表对各子块的 DCT 系数进行量化并调整,然后按 Z 字形扫描的顺序从每块中提取包含直流分量在内的前 8 个系数的量化值并将其变换为无损的二进制编码依序连接生成水印信号 P 。与 DWT 在对灰度图像进行压缩方面相比,利用 DCT 变换有以下优势:其水印数据量只有 DWT 对水印信息进行压缩后的一半,所需嵌入的信息量少;算法复杂度低,不涉及多分辨率的小波分解和重构;算法灵活,如果在实验的过程中对恢复的压缩图像质量不满意,可将提取的量化系数个数进行增加。

2.2 行列监督码的纠错原理

行列监督码是 2 维的奇偶监督码,也称为方阵校验码。如图 3 所示,这种编码方法可以克服奇偶监督码不能发现偶数个差错的缺点。水印信号经过

$$\begin{array}{cccccc}
 a(1,1) & a(1,2) & \cdots & a(1,n) & a(1,n+1) & \\
 a(2,1) & a(2,2) & \cdots & a(2,n) & a(2,n+1) & \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \\
 a(m,1) & a(m,2) & \cdots & a(m,n) & a(m,n+1) & \\
 a(m+1,1) & a(m+1,2) & \cdots & a(m+1,n) & a(m+1,n+1) &
 \end{array}$$

图 3 行列监督编码

Fig. 3 The coding of range supervised

行列监督编码后在所构成的矩阵中行向或列向 1 的个数固定为偶数,这样,当检测过程中提取出的水印序列发生奇数位错码时,纠错解码过程将因行或列向中 1 的个数不符合偶数规律而发现有错,根据出错的行或列的位置纠正错误。

其第 i 行的行监督(偶监督)方程为

$$a(i,1) \oplus a(i,2) \oplus \cdots \oplus a(i,n) \oplus a(i,n+1) = 0 \quad 1 \leq i \leq m \quad (1)$$

第 j 列的列监督(偶监督)方程为

$$a(1,j) \oplus a(2,j) \oplus \cdots \oplus a(m,j) \oplus a(m+1,j) = 0 \quad 1 \leq j \leq n+1 \quad (2)$$

式中, \oplus 为异或算子。

2.3 块视觉阈值 JND 的计算

从信号处理的角度观察,水印的嵌入过程可看作是在强背景(原始载体图像)上叠加一个弱信号(水印信号)。只要水印信号低于对比门限,人类的视觉系统就无法感觉到水印的存在,因此通过利用人类视觉系统中的视觉掩盖效应的以下几个特性,计算出基于块的临界噪声阈值 JND(just noticeable difference),保证水印具有良好的透明性和鲁棒性:

(1) 对不同亮度区域的噪声的视觉敏感性不同,通常对中等灰度最为敏感,而低灰度和高灰度两个方向呈非线性下降。当前块 $B_{u,v}$ 的亮度掩盖效应为

$$L(u,v) = \begin{cases} \frac{\beta[\text{ave}(u,v) - I_1]^2}{I_1^2} + 0.02 & \text{ave}(u,v) \leq I_1 \\ 0.02 & I_1 < \text{ave}(u,v) < I_2 \\ \frac{\beta[\text{ave}(u,v) - I_2]^2}{(255 - I_2)^2} + 0.02 & \text{ave}(u,v) > I_2 \end{cases} \quad (3)$$

其中, $\text{ave}(u,v)$ 为当前块的平均灰度值, I_1 为载体图像的全局灰度最小值 $I_1 = \min(I(u,v))$, I_2 为载体图像的全局灰度最大值 $I_2 = \max(I(u,v))$ 。

(2) 人眼对图像平滑区域噪声较为敏感而对纹理区域噪声较为不敏感,由于熵值较小的部分对应平滑区域,而熵值较大的部分对应纹理区域,因此可

用熵值来刻画图像分块的纹理掩盖效应,记块 $B_{u,v}$ 的熵值为 $H(u,v)$ 。

(3) 2 维数字图像经一层小波变换后得到 4 个子图像 LL(水平和垂直方向均为低通的子带)、LH(水平方向为低通,垂直方向为高通的子图像)、HL(水平方向为高通,垂直方向为低通的子带)、HH(水平和垂直方向均为高通的子带)。人眼对不同方向不同层次的中高频子带图像的噪声不是非常敏感,特别是 45° 方向的高频子带噪声更不敏感。设不同层 $l(l=0,1,2)$ 不同方向子带对噪声的掩盖因子为 $S(l,\theta)$, $\theta \in \{LH,HL,HH\}$, $S(l,\theta)$ 可由下式估计:

$$S(l,\theta) = \begin{cases} \sqrt{2} & \theta = HH \\ 1 & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

图像块经过一层小波变换后各细节子带的视觉容许噪声阈值为

$$JND(u,v,l,\theta) = L(u,v) \cdot H(u,v) \cdot S(l,\theta) \quad (5)$$

3 水印嵌入算法

嵌入算法的具体步骤如下:

(1) 水印信号的生成 首先,因为灰度水印图像的信息量很大,所以在对灰度水印图像进行嵌入之前要对其进行数据压缩,先将灰度水印图像中每个像素值减去 128,然后将其分割成互不覆盖的 8×8 分块,对每个分块进行 DCT 变换后,用 JPEG 亮度量化表对各子块的 DCT 系数进行量化并调整,然后按 Z 字形扫描的顺序从每块中提取出直流量和 7 个中频的量化值并依序生成水印信号 W ,经过上述处理后, W 中包含水印图像中的绝大部分信息,也就是说可以从信号 W 中恢复水印图像,接下来将 W 中每一个数转换为 7 位二进制码,按序排列得到二进制序列矩阵 Q ,分别取出 Q 中的每一行和每一列的二进制序列,将其进行奇偶校验编码,将行的编码结果存在 Q 中每一行的最后一位,最终 Q 变成一个 8×8 的二进制系数矩阵。将列的编码结果作为 Q 的一个部分存放在 Q 的后面。为了增强水印的鲁棒性和安全性,由密钥 key 利用混沌序列生成一个二值混沌序列 p , $p = \{p(i) | p(i) \in \{0,1\}, 0 \leq i < m \times n\}$,由 p 对水印信号 Q 进行混沌调制,得到待嵌入水印信号 W_i , $W_i(i) = p(i) \oplus Q(i)$, $0 < i < m \times n$ 。

(2) 水印信号的嵌入 Hilbert 曲线是 n 维空间到 1 维空间的 1-1 映射,通常利用光栅扫描将图像

的2维矩阵转换为1维序列。并且 Hilbert 扫描是所有扫描曲线中最好地保持图像空间局部邻接性的曲线。因此将原图像按 8×8 的大小进行 Hilbert 扫描,得到原图像的 8×8 分块的 Hilbert 索引序列 Hb ,然后在 Hb 中顺序选取两相邻 8×8 块 $Hb(2\tau)$ 和 $Hb(2\tau + 1)$,找到它们在原图像中的位置,分别对它们进行2维一层小波变换,并选取相应的中高频子带,结合视觉容许临界噪声阈值 $JND(u, v, l, \theta)$,通过调整两对应细节子带均值之间的大小关系自适应地嵌入水印信号。 $\lambda(i, j)$ 为每个分块所能叠加噪声的权值。

$$\mu = \frac{\{JND(u_1, v_1, l, \theta) + JND(u_2, v_2, l, \theta)\}}{2}$$

则详细的水印嵌入规则如下^[3]:

如果 $\omega_i(t) = 1$, 且 $dif < \mu$

$$\left. \begin{aligned} D'_1(i, j) &= D_1(i, j) + \lambda_1(i, j) \cdot \frac{(\mu - |dif|)}{2} \\ D'_2(i, j) &= D_2(i, j) - \lambda_2(i, j) \cdot \frac{(\mu - |dif|)}{2} \end{aligned} \right\}$$

其中, $dif = \sum_i \sum_j D_1(i, j) - \sum_i \sum_j D_2(i, j)$

如果 $\omega_i(t) = 0$, 且 $dif < \mu$

$$\left. \begin{aligned} D'_1(i, j) &= D_1(i, j) - \lambda_1(i, j) \cdot \frac{(\mu - |dif|)}{2} \\ D'_2(i, j) &= D_2(i, j) + \lambda_2(i, j) \cdot \frac{(\mu - |dif|)}{2} \end{aligned} \right\}$$

其中, $dif = \sum_i \sum_j D_2(i, j) - \sum_i \sum_j D_1(i, j)$

在此算法中,当嵌入的水印值 $W_i(p) = 1$ 时,需保证 D'_{u_1, v_1} 的系数总和一定要大于 D'_{u_2, v_2} 的系数总和。如果有 $dif < \mu$ 且 $dif < 0$ ($dif = \sum \sum D_1 - \sum \sum D_2$) 的情况,则使用 dif 的绝对值并结合每个细节子块的视觉阈值 $JND(u, v, l, \theta)$ 来调整 D'_{u_1, v_1} 和 D'_{u_2, v_2} 的系数值,除了保证使 $\sum_i \sum_j D'_1 - \sum_i \sum_j D'_2$ 的值大于0,还能保证 $D_1(i, j)$ 所添加的 $\lambda_1(i, j) \cdot \frac{(\mu - |dif|)}{2}$ 是个较小的扰动值。同理当嵌入的水印

值 $W_i(p) = 0$, 使 $\sum_i \sum_j D'_2 - \sum_i \sum_j D'_1 > 0$ 成立。

(3)在载体图像中自适应地嵌入 num 个水印图像后,对所有经过系数调整后的子块进行一层 DWT 反变换,即得到嵌入水印的图像。算法的流程图如图4所示。

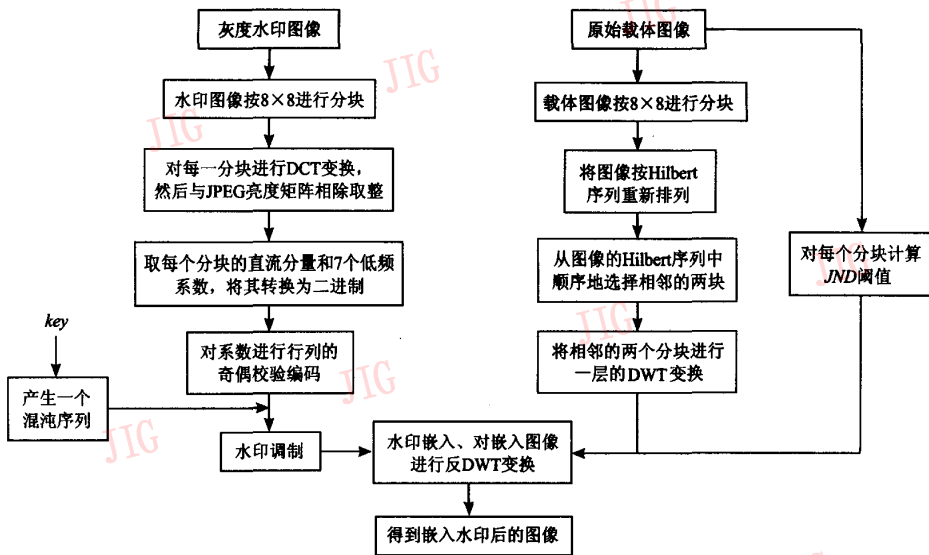


图4 水印嵌入算法流程图

Fig. 4 The flow chart on the part of watermark embed

4 水印提取算法

水印的嵌入、图像压缩以及其他图像处理可能

会使图像的边缘产生一定的漂移,因此在提取水印时是提取 num 个版本,然后用一个判定函数判断水印的值。

嵌入水印图像检测水印的过程为:先对嵌入水

印图像按 8×8 分块, 进行 Hilbert 扫描, 顺序地选取相邻的两块, 然后对这两块进行一层 DWT 变换操作。选择其中的一个子带, 比较这两块在相对应子带中的和, 水印提取的具体规则如下:

$$W'_i(s, t) = \begin{cases} 1 & \sum_i \sum_j D_1(i, j) \geq \sum_i \sum_j D_2(i, j) \\ 0 & \sum_i \sum_j D_1(i, j) < \sum_i \sum_j D_2(i, j) \end{cases} \quad (6)$$

$$0 \leq r, s \leq num, t = 0, 1, 2, \dots, m \times n - 1 + 128$$

$W'_i(s, t)$ 是提取的第 r ($0 \leq r \leq num$) 个水印版本, 然后在 num 个水印版本中提取出正确的调制过的水印信号 $W'_i(t)$, 再由密钥 key (与水印嵌入时的相同) 使用混沌序列生成二值混沌序列 P 对 $W'_i(t)$ 进行解调, 即 $W'_i(t) = W'_i(t) \oplus P(t)$, $t = 0, 1, 2, \dots, m \times n - 1 + 128$, $W'_i(t)$ 即是所提取出的水印图像。

将解调后的 $m \times n$ 个水印信号值映射成 2 维 8×8 矩阵, 对矩阵每行, 每列求奇偶校验值, 与原有的行列奇偶校验值做比较, 找出发生改变的元素位置, 将这个发生改变的元素求反。然后将校验后的二进制的矩阵转换成十进制数。再用 JPEG 亮度量化矩阵去乘每个矩阵, 得到反量化后的水印系数矩阵, 对这个矩阵求反 DCT 变换, 最后将这些系数装配到 $m \times n$ 大小的矩阵中去, 得到恢复后的水印图像。

5 实验结果与分析

实验用 512×512 的 256 级灰度图像 Barbara 为载体 (如图 5(b)), 32×32 的 256 级灰度图像 duck 为水印图像 (如图 5(a)) 进行实验, 载体图像在分块后经一层小波变换, 在 3 个细节子带中嵌入 num ($num = 6$) 个水印版本。



图 5
Fig. 5

图 6(a)、(b) 是嵌入水印图像进行 3 次锐化和 3 次边缘锐化后提取的水印, 提取水印结果 (相似度 NC) 都高达 0.9998; 图 6(c) ~ (e) 分别是对含水水印图像实施直方图均衡、对比度增强 50%、亮度增强 50% 操作后提取水印, 恢复水印视觉效果极好, 其 NC 值也很高, 分别为 0.9998, 0.99028, 0.9998; 这证实了信号增强攻击几乎不会影响本文算法对水印的正确提取。

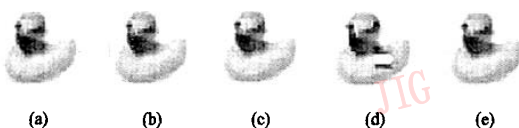


图 6 经信号增强处理后提取的水印图像

Fig. 6 The pick-up watermark after the watermarked image was processed by the enhancement of signal

图 7(a) 是含水水印图像 “Barbara” 经 4% 的椒盐噪声后提取的水印, 恢复水印 NC 值分别为 0.9701, 图 7(b) 是截去含水水印图像左上角 1/4 部分, 提取的水印, $NC = 0.998$, 图 7(c) 是 10% 旋转扭曲操作所提取的水印, $NC = 0.8879$ 。



图 7 平滑滤波与噪声叠加实验

Fig. 7 The pick-up watermark after the watermarked image was processed by smoothed filter and added noise

最后在表 1 中给出本算法与同类算法文献 [6] 的一些性能比较。

表 1 本文算法与文献[6]的性能比较

Tab.1 The comparison between mentioned algorithm and the literature 6

	图像自适应	自我纠错能力	对比度增强处理	亮度增强处理	抗同步攻击
本文算法	自适应 (考虑了 HVS)	采用奇偶行列 纠错编码	NC = 0.999 8 50% 对比度增强	NC = 0.990 28 50% 亮度增强	抗积压、旋转、扭曲
文献[6]中 算法	只是将载体图像的 部分信息作为水印	没有考虑	NC = 0.91 40% 对比度增强	NC = 0.76 25% 亮度增强	没有给出抗同步 攻击实验

6 结 论

将 DCT 与 DWT 域相结合的向载体图像中嵌入灰度数字水印图像的自适应 2 维水印算法,利用 DCT 变换将灰度水印图像的数据压缩到最小,与图像进行一层小波变换后提取低频子带系数作为水印信息相比,其数据量只有后者的一半。另外,根据图像小波变换后小波系数的特点,结合人眼视觉掩盖特性,有效地提取出人眼视觉敏感度低且相对稳定的子带信息,通过这部分信息的调制实现水印的嵌入,达到水印的鲁棒性和不可见性的较好结合。实验结果表明,该算法对图像的有损压缩(JPEG)、剪切、挤压、扭曲、滤波、亮度和对比度增强、锐化以及加噪都具有较好的鲁棒性。

参考文献 (References)

1 Yi Kai-xiang, Shi Jiao-ying. Adaptive 2-dimension image watermarking algorithm[J]. Journal of Image and Graphic, 2001, 6(5):444 ~ 449. [易开祥,石教英. 自适应二维数字水印系统[J]. 计算机图

形图像学报, 2001, 6(5): 444 ~ 449.]

2 Niu Xia-mu, Lu Zhe-ming, Sun Sheng-he. Digital watermarking of still images with gray-level digital watermarking [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2000, 46(1): 137 ~ 145.

3 Niu Xia-mu, Lu Zhe-ming, Sun Sheng-he. Digital watermarking technique based on multiresolution decomposition [J]. Acta Electronic Sinica, 2000, 28(8):1 ~ 4. [牛夏牧,陆哲明,孙圣和. 基于多分辨率的数字水印技术[J]. 电子学报, 2000, 28(8):1 ~ 4.]

4 Yang Heng-fu, Chen Xiao-wei. A robust image-adaptive public watermarking technique in wavelet domain [J]. Journal of Software, 2003, 14(9):1652 ~ 1660. [杨恒伏,陈孝威. 小波域鲁棒自适应公开水印技术[J]. 软件学报, 2003, 14 (9):1652 ~ 1660.]

5 Yang Bo, Chen Xiao-wei. Public watermarking algorithm based on the quantizing DCT coefficients[A]. In: Proceedings of the 12th national conference on multimedia technology [C], Guiyang Chian, 2003: 279 ~ 287. [杨波,陈孝威. 基于 DCT 系数量化的公开水印方案 [A]. 见:第十二届全国多媒体技术学会会议[C], 贵阳,2003: 279 ~ 287.]

6 Huang Da-ren, Liu Jiu-feng, Huang Ji-wu. An embedding strategy and algorithm for image watermarking in DWT domain [J]. Journal of Software, 2002, 13(7):1290 ~ 1297. [黄达人,刘九芬,黄继武. 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.]