

# 小波域鲁棒自适应公开水印技术\*

杨恒伏<sup>+</sup>, 陈孝威

(贵州大学 信息与计算机科学学院 计算机科学系, 贵州 贵阳 550025)

## A Robust Image-Adaptive Public Watermarking Technique in Wavelet Domain

YANG Heng-Fu<sup>+</sup>, CHEN Xiao-Wei

(Department of Computer Science, School of Information and Computer Science, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

+Corresponding author: Phn: 86-13985015604, E-mail: hengfuyung@etang.com

<http://comp.gzu.edu.cn>

Received 2002-11-26; Accepted 2003-03-20

Yang HF, Chen XW. A robust image-adaptive public watermarking technique in wavelet domain. *Journal of Software*, 2003,14(9):1652~1660.

<http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/1652.htm>

**Abstract:** Most previous DWT-based watermarking algorithms belong to either private watermarking algorithms or fragile watermarking algorithms, but there are few DWT-based robust public watermarking techniques for copyright protection. By taking full advantage of the masking characteristics of the human visual system, first a JND (just noticed difference) threshold matrix based on block is given in this paper, and then a robust image-adaptive public watermarking technique operating in DWT domain is presented. Firstly, the 8×8 blocks of the original image are rearranged into a 1-D Hilbert sequence in Hilbert scanning order. Then two neighboring blocks are selected from the Hilbert sequence of the host image blocks in turn, and 1-level DWT is applied to the two chosen blocks. Finally, a corresponding detail subband is chose from three detail subbands of the two neighboring blocks at a time, respectively. A binary watermark with visually recognizable patterns is embedded into the host image by modifying the polarity of the average value of the two corresponding subbands. The embedded watermark is invisible to human eyes and adapted to the original image by exploiting the HVS masking characteristics. The experimental results show that the proposed algorithm is effective and robust to common image processing operations and some geometric distortions such as cropping, pinching, pixel-shift, and so on, especially, it receives better robustness under signal enhancement operations. So a conclusion can be made that the proposed technique is practical.

**Key words:** discrete wavelet transformation; public watermarking technique; human visual system; Hilbert scanning

**摘 要:** 先前众多的 DWT(discrete wavelet transform)域水印算法几乎都是私有水印或易脆水印,而针对版权保

\* Supported by the National Grand Fundamental Research Program of Ministry of Education of China under Grant No.200139 (国家教育部科研重点项目); the Natural Science Foundation of Guizhou Province of China under Grant No.1993414 (贵州省自然科学基金)

第一作者简介: 杨恒伏(1974—),男,湖南益阳人,硕士,主要研究领域为数字水印,图像压缩编码,小波理论及其应用。

护的鲁棒的、公开的小波域水印算法却极少.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 noticed difference),进而提出了一种基于 DWT 的鲁棒公开水印技术.算法首先把原图像各  $8 \times 8$  块按 Hilbert 扫描顺序排列,然后在原图像分块的 Hilbert 序列中选取两相邻块分别进行一层 DWT,再结合各分块 JND 阈值,通过不同强度地调整两相邻块各对应细节子带均值之间的大小关系以自适应地嵌入水印.嵌入水印具有很好的透明性,水印嵌入强度是与原图像特征相自适应的.同时,水印的提取无须求助于原图像.此外,实验结果也证明,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高的鲁棒性,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.

关键词: 离散小波变换;公开水印技术;人类视觉系统;Hilbert 扫描

中图法分类号: TP309 文献标识码: A

数字水印作为一种解决数字产品版权问题的有效手段,近年来得到了人们的广泛关注,并逐渐成为当今国际 IT 学术界的一个研究热点.一个有效的数字水印技术必须具备一些基本特征:透明性、鲁棒性、安全性等.而水印透明性与鲁棒性是一对矛盾,解决这一矛盾的有效途径之一就是充分利用人类视觉系统(human visual system)的屏蔽特性<sup>[1]</sup>.由于小波变换的良好时-空局部特性具有与 HVS 屏蔽特性极其相符的变换机制,同时,随着 JPEG2000 和 MPEG-4 中小波变换的采用并占据重要地位,使得 DWT 域水印算法具有广阔的前景,越来越多的研究人员开始重视 DWT 域水印算法的研究.

过去几年中,产生了很多基于 DWT 的水印算法,但其中大多数都属于私有水印<sup>[2-5]</sup>或易脆水印<sup>[6,7]</sup>,而针对版权保护的鲁棒公开水印算法却极少.文献[2]提出了一个基于 DWT 的隐形水印嵌入对策,并应用该对策提出了一种自适应水印算法,但其水印检测需要原图,是一种私有水印方案.Podichuk 在文献[3]中提出了一种基于小波变换的图像自适应水印方法,利用视觉模型来确定水印嵌入位置和嵌入强度,但它仍未能实现盲水印检测.文献[4]以一有意义的二值图像为水印,利用小波变换的层次结构将同一水印反复嵌入到不同的位置,在高频部分嵌入较多水印信息,而在低频部分嵌入较少的信息,但同样水印检测不能脱离原图像,且其仅能抗压缩比为 2.69 的 JPEG 压缩.文献[5]提出了一种基于多分辨率的水印算法,以一、二值图像为水印,将不同分辨率的水印嵌入到原图像相应分辨率层中,能抵抗一定程度的 JPEG 压缩,但在水印检测时仍需求助于原图像.文献[8]中描述了一种基于冗余小波变换的盲水印技术,算法直接根据小波系数的重要性的不同而不同强度地自适应嵌入水印信息,但它所实现的只是基于阈值判定的检测意义上的公开水印.文献[9]通过充分考虑各图像子带纹理和亮度信息,给出了一种基于像素的水印掩蔽计算方法,最后基于假设检验,提出了一种盲水印检测方案,其水印为一伪随机序列,其水印的检测也只是判断水印的存在与否,而不是直观的水印抽取,算法实用性不强.牛夏牧等人在文献[10]中提出了一种基于多分辨率的数字水印技术,虽然其水印提取不需要原图,但它需要用到一个用户待定系数  $F$ ,同样未能完全实现盲水印提取.张军等人在文献[11]中提出了一种基于多小波的公开水印算法,但这种算法未能很好地考虑人类视觉系统掩蔽特性,算法也未能给出抗同步攻击的实验分析.

本文提出了一种鲁棒的基于分块 DWT 的图像自适应公开水印技术.算法以一幅有意义的二值图像为水印,在充分考虑 HVS 掩蔽特性的基础上,给出了一种定量的符合 HVS 掩蔽特性的基于图像分块的噪声阈值计算方法.同时,算法利用了 Hilbert 扫描<sup>[12,13]</sup>,能很好地保持图像空间局部特性的特点,在结合各块视觉阈值的基础上,通过不同强度地调整图像分块的 Hilbert 序列中两相邻分块小波变换后各对应细节子带均值之间的大小关系,以自适应地嵌入水印信号,真正实现了盲水印提取.实验结果表明,该算法是有效的,较好地解决了水印透明性与鲁棒性之间的矛盾,对通常的图像处理操作和裁剪、挤压、像素移位等几何攻击有较强的鲁棒性.

## 1 小波域鲁棒自适应公开水印算法

### 1.1 块视觉阈值 JND 计算

为了保证水印同时具有良好的透明性和鲁棒性,很多自适应水印算法<sup>[2,3,8,9]</sup>都开始考虑结合人眼视觉屏蔽特性.本文的算法基于块的临界噪声阈值 JND(just noticed difference)计算主要利用了 HVS 的以下几个特性<sup>[14]</sup>:

(1) 人眼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,在中等灰度很宽的范围中 Weber 比保持常数 0.02,向低灰度和高灰度两个方向呈非线性下降,如图 1 所示<sup>[15]</sup>(实验中,我们不妨假设这种非线性为关于灰度的二次曲线,且对比灵敏度最大不超过 $\beta$ ).记当前块为  $B_{u,v}$ ,它在原图像中对应位置为 $(u,v)$ ,块均值为  $ave(u,v)$ ,设不同亮度对噪声的掩盖因子为  $\omega(u,v)$ ,则 $\omega(u,v)$ 可用公式(1)表示如下:

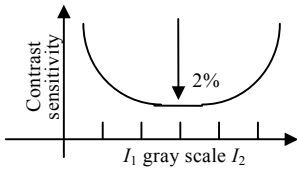


Fig.1 Contrast sensitivity  
图 1 对比灵敏度

$$\omega(u,v) = \begin{cases} \frac{(\beta - 0.02)[ave(u,v) - I_1]^2}{I_1^2} + 0.02, & \text{if } ave(u,v) \leq I_1 \\ 0.02, & \text{if } I_1 < ave(u,v) \leq I_2 \\ \frac{(\beta - 0.02)[ave(u,v) - I_2]^2}{(255 - I_2)^2} + 0.02, & \text{if } ave(u,v) > I_2 \end{cases} \quad (1)$$

(2) 人眼对图像平滑区噪声较敏感而对纹理区噪声较为不敏感.由于熵值较小的对应平滑区,而熵值较大的对应图像纹理区,我们可用它来刻画图像分块的纹理掩盖效应.记块  $B_{u,v}$  的熵值为  $H'(u,v)$ ,为增强纹理对水印嵌入强度的掩盖效应,我们将其熵值归一化到区间 $[a,b]$ 上,

$$H(u,v) = \frac{b - a}{\max(H') - \min(H')} [H'(u,v) - \min(H')] + a, \quad (2)$$

$H(u,v)$ 即为所得纹理掩盖效应因子.

基于上面(1),(2)的分析,图像  $8 \times 8$  分块  $B_{u,v}$  的可容许噪声阈值可表示为上述两项的乘积.

$$\Gamma'(u,v) = \omega(u,v) \cdot H(u,v). \quad (3)$$

为保证水印嵌入强度的可控,以确保嵌入水印具有较好的不可见性,再将  $\Gamma'(u,v)$  归一化到区间 $[c,d]$ 上,即得到最终图像各  $8 \times 8$  分块  $B_{u,v}$  的临界可见噪声门限,见式(4):

$$\Gamma(u,v) = \frac{d - c}{\max(\Gamma') - \min(\Gamma')} [\Gamma'(u,v) - \min(\Gamma')] + c. \quad (4)$$

(3) 二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,特别是对  $45^\circ$  方向的高频子带噪声更不敏感(如 HH 子带)<sup>[9]</sup>.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:

$$S(l,\theta) = \begin{cases} \sqrt{2}, & \text{if } \theta = HH \\ 1, & \text{else} \end{cases} \begin{cases} 1.00, & l=0 \\ 0.32, & l=1 \\ 0.16, & l=2 \end{cases}. \quad (5)$$

这样,图像分块经一层小波变换后各细节子带  $D_{u,v}^{l,\theta}$  的视觉可容许噪声阈值可由公式(6)来表示.

$$J(u,v,l,\theta) = \Gamma(u,v) \cdot S(l,\theta). \quad (6)$$

通过上述分析与推导可知,公式(6)临界噪声阈值  $J(u,v,l,\theta)$  考虑了图像分块不同亮度的对比度掩盖效应、不同纹理的屏蔽效应以及人类视觉系统对不同分辨率、不同方向特性的敏感性,确保了水印嵌入强度的可控和嵌入水印的高不可见性,并使得水印嵌入强度与原图像特征相适应.此外,在保证水印高透明性的前提下水印强度可达到较大,这为本文算法的鲁棒性提供了有力的保证. 蘑菇

### 1.2 水印嵌入算法

依据文献[2]提出小波域图像水印嵌入对策,为保证算法同时具有较好的透明性和鲁棒性,本文选择在原图像各  $8 \times 8$  分块一层小波变换后 3 个细节子带进行水印嵌入,水印嵌入强度以式(6)的噪声阈值  $J(u,v,l,\theta)$  为上限.算法的基本思想是:首先将原始图像各  $8 \times 8$  分块按 Hilbert 扫描顺序排列,然后在原图像  $8 \times 8$  分块 Hilbert 序列中

选取两相邻分块分别进行一层 DWT,再结合各分块 JND 阈值,通过不同强度地调整两相邻块 3 个对应细节子带均值间的大小关系以完成水印自适应地嵌入.同时,为了进一步增强算法鲁棒性,无冗余地在原图像中嵌入多个水印版本,且水印嵌入前我们先利用混沌序列<sup>[16,17]</sup>对其进行混沌调制.水印嵌入基本框图如图 2 所示.

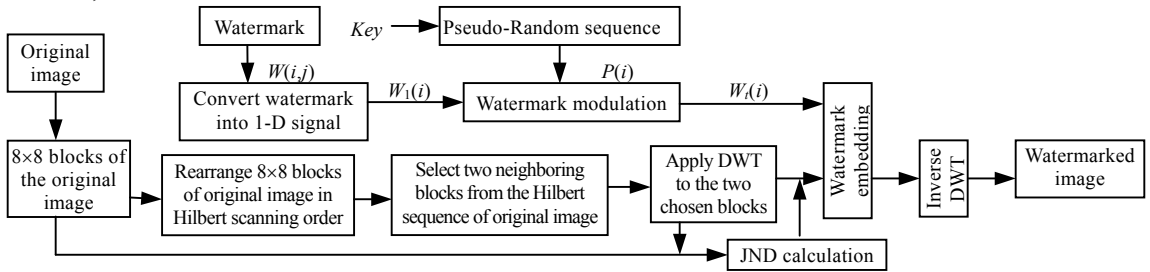


Fig.2 Block diagram of watermark embedding

图 2 水印嵌入框图

水印嵌入具体由以下 3 个步骤完成:

(1) 水印信号生成.先由二值水印图像获得水印信号  $W$ ,然后利用行扫描将其映射为一维向量  $W_1, W_1 = \{W_1(i) | W_1(i) \in \{0,1\}, 0 \leq i < m \times n\}, m \times n$  为水印图像大小.为增强水印系统的鲁棒性与安全性,再由密钥  $key$  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  $W_1$  进行混沌调制,得到待嵌入水印信号  $W_t, W_t(i) = b(i) \oplus W_1(i), 0 \leq i < m \times n$ ,这里,“ $\oplus$ ”表示异或(以下同).

(2) 水印信号嵌入.C.Gostman 和 M.Lindenbaum 证明了 Hilbert 曲线是所有扫描曲线中能够最好地保持空间局部邻接性的曲线,Hilbert 扫描能够较好地保持图像空间局部相关性<sup>[13]</sup>.于是我们先将原图像  $I(M \times N \times 8)$  按  $8 \times 8$  分块,并将各  $8 \times 8$  块按 Hilbert 扫描顺序排列,得到原图像  $8 \times 8$  分块的 Hilbert 索引序列  $Hb, Hb = \left\{ Hb(\tau), \tau = 0, 1, \dots, \frac{M \times N}{128} - 1 \right\}$ ;然后依次从图像分块的 Hilbert 序列  $Hb$  中选出两相邻  $8 \times 8$  块  $Hb(2\tau)$  和  $Hb(2\tau + 1)$ ,据此可以找到两相邻块在原图像中的位置  $(u_1, v_1), (u_2, v_2)$ ,分别记为  $B_{uv1}$  和  $B_{uv2}$ ,对它们分别作一层二维离散小波变换;最后,每次在选定的两相邻块  $B_{uv1}$  和  $B_{uv2}$  各自细节子带中各选取一对对应子带  $D_{u_1, v_1}^{l, \theta}$  和  $D_{u_2, v_2}^{l, \theta}$  (以下简称  $D_1$  和  $D_2$ ),再结合式(6)给出的临界噪声阈值  $J(u, v, l, \theta)$ ,通过不同强度地调整两对应细节子带均值间的大小关系来自适应地嵌入水印信号.

因为二维图像小波变换后各细节子带系数分布与原图像纹理特征分布极其相符,于是我们可直接利用细节子带小波系数来表征细节子带各像素位可容许失真的强度因子,

$$\lambda_{u_r, v_r}^{l, \theta}(i, j) = \frac{|D_{u_r, v_r}^{l, \theta}(i, j)| + \delta}{\sum_{i=0}^{\frac{8}{2^{l+1}}-1} \sum_{j=0}^{\frac{8}{2^{l+1}}-1} \left\{ |D_{u_r, v_r}^{l, \theta}(i, j)| + \delta \right\}}, \quad t \in \{1, 2\}. \quad (7)$$

式(7)中,  $\delta$  是为了防止分母为“0”.同时,为了叙述方便,以下  $\lambda_{u_r, v_r}^{l, \theta}(i, j)$  简记为  $\lambda_t(i, j)$ .具体地,当水印信号为“1”

时,则增加  $D_1$  中各小波系数的值,减少  $D_2$  中各系数的值,使得  $\sum_{i=0}^{\frac{8}{2^{l+1}}-1} \sum_{j=0}^{\frac{8}{2^{l+1}}-1} D_1(i, j) > \sum_{i=0}^{\frac{8}{2^{l+1}}-1} \sum_{j=0}^{\frac{8}{2^{l+1}}-1} D_2(i, j)$ ;相反,如果水印信

号为“0”,则减少  $D_1$  中各小波系数的值而增加  $D_2$  子带中各系数的值,使得  $\sum_{i=0}^{\frac{8}{2^{l+1}}-1} \sum_{j=0}^{\frac{8}{2^{l+1}}-1} D_2(i, j) > \sum_{i=0}^{\frac{8}{2^{l+1}}-1} \sum_{j=0}^{\frac{8}{2^{l+1}}-1} D_1(i, j)$ .令

$$\mu = \frac{\{J(u_1, v_1, l, \theta) + J(u_2, v_2, l, \theta)\}}{2}, \text{更详细的嵌入规则可表示如下:}$$

$$\begin{cases} \begin{cases} D'_1(i, j) = D_1(i, j) + \lambda_1(i, j) \cdot \frac{(\mu - dif)}{2} \\ D'_2(i, j) = D_2(i, j) - \lambda_2(i, j) \cdot \frac{(\mu - dif)}{2} \end{cases}, & \text{if } W_t(t) = 1, \text{ 且 } dif < \mu. \text{ 其中 } dif = \sum_i \sum_j D_1(i, j) - \sum_i \sum_j D_2(i, j) \\ \begin{cases} D'_1(i, j) = D_1(i, j) - \lambda_1(i, j) \cdot \frac{(\mu - dif)}{2} \\ D'_2(i, j) = D_2(i, j) + \lambda_2(i, j) \cdot \frac{(\mu - dif)}{2} \end{cases}, & \text{if } W_t(t) = 0, \text{ 且 } dif < \mu. \text{ 其中 } dif = \sum_i \sum_j D_2(i, j) - \sum_i \sum_j D_1(i, j) \end{cases} \quad (8)$$

可以证明:

(1) 当  $W_t(t) = 1$  时:

如果  $\sum_i \sum_j D_1(i, j) - \sum_i \sum_j D_2(i, j) \geq \mu$  时, 没做修改, 显然有  $\sum_i \sum_j D'_1(i, j) - \sum_i \sum_j D'_2(i, j) \geq \mu$  成立;

如果  $\sum_i \sum_j D_1(i, j) - \sum_i \sum_j D_2(i, j) < \mu$  时, 有

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

所以有  $\sum_i \sum_j D'_1(i, j) - \sum_i \sum_j D'_2(i, j) \geq \mu$  成立.

(2) 同理可证, 当  $W_t(t) = 0$  时, 有  $\sum_i \sum_j D'_2(i, j) - \sum_i \sum_j D'_1(i, j) \geq \mu$  成立.

这就确保了在水印提取时, 可据此准确恢复出水信号, 且无须用到原图像.

(3) 对所有经过系数调整后的子块进行一层 DWT 反变换, 即得到嵌入水印图像  $I'$ . 本文之所以利用图像分块各细节子带均值之间的大小关系嵌入水印, 而不直接利用小波系数之间的关系是因为图像分块 Hilbert 序列中两相邻块之间具有很好的局部相关性, 而其小波系数间差别可能较大, 这样, 通过改变两相邻块小波变换后, 各细节子带均值间关系嵌入水印, 就不会引起小波系数有大的改变, 有利于水印的不可察觉性. 显然, 式(6)中的图像分块各细节子带的临界噪声阈值  $J(u, v, l, \theta)$  和式(7)中的基于小波系数的调节因子  $\lambda_{u,v}^{l,\theta}(i, j)$  也保证了水印信号的透明性; 同时它们也保证了在视觉不可知觉的范围内水印强度可达到较大. 再者, 多版本水印嵌入的使用进一步增强了水印的抗攻击性能.

### 1.3 水印提取算法

水印信号提取基本上是水印嵌入的逆过程:

(1) 首先按水印嵌入步骤(2)确定两相邻块(在图像分块的 Hilbert 序列中相邻)  $B_{uv1}$  和  $B_{uv2}$ , 以及其一一对应细节子带  $\hat{D}_{u_1, v_1}^{l,\theta}$  和  $\hat{D}_{u_2, v_2}^{l,\theta}$  (以下简称  $\hat{D}_1$  和  $\hat{D}_2$ ), 则可由下式提取出  $num$  个水印信号版本,  $num = \frac{3 \times M \times N}{8 \times 8 \times 2 \times m \times n}$ .

$$W'_r(s, t) = \begin{cases} 1, & \text{if } \sum_i \sum_j \hat{D}_1(i, j) \geq \sum_i \sum_j \hat{D}_2(i, j) \\ 0, & \text{if } \sum_i \sum_j \hat{D}_1(i, j) < \sum_i \sum_j \hat{D}_2(i, j) \end{cases}, \quad 0 \leq s < num, \quad t = 0, 1, 2, \dots, m \times n - 1. \quad (9)$$

(2) 然后从  $num$  个水印版本中提取出调制水印信号  $W'_t$ ,

$$W'_t(t) = \begin{cases} 1, & \text{if } \sum_{s=0}^{num-1} W'_r(s, t) \geq \frac{num}{2} \\ 0, & \text{else} \end{cases}, \quad t = 0, 1, 2, \dots, m \times n - 1. \quad (10)$$

(3) 再由密钥  $key$ (与水印嵌入时相同)使用混沌序列生成二值混沌序列  $P$  对  $W'_t$  进行解调, 即  $W'_1(t) = W'_t(t) \oplus P(t), t = 0, 1, 2, \dots, m \times n - 1$ .

(4) 最后按行扫描顺序将  $W'_1$  映射成二维矩阵  $W'$ ,  $W' = \{W'(i, j), 0 \leq i < m, 0 \leq j < n\}$ ,  $W'(i, j) \in \{0, 1\}$ ,  $W'$  即是恢复出的水印信号. 因为文献[4,5,10,11]中相似性准则是针对灰度图像的, 对二值水印不够客观、公正(有些偏高), 本文采用如下的针对二值水印的相似性公式作为恢复水印质量客观评判标准(其中  $\bar{W}$  表示  $W$  的逻辑非运算).

$$NC(\text{normalized correlation}) = \frac{\sum_i \sum_j W'(i, j) \oplus \overline{W}(i, j)}{m \times n} \quad (11)$$

## 2 仿真实验及攻击分析

仿真实验以一幅 32×32 的二值图像为水印(如图 3 所示)。式(1)中,β, I<sub>1</sub>, I<sub>2</sub> 分别取值为 20%, 80, 150; 式(2)中, α, b 分别取值为 1 和 8; 式(4)中, c, d 分别取值为 48, 128; 式(7)中, δ 取值为 1。在各图像分块经一层小波变换后的 3 个细节子带中嵌入 num(num=6) 个水印版本。本文攻击实验除 JPEG 有损压缩和小波压缩外都是在 Photoshop 6.0 上完成的, 以下给出算法的一些鲁棒性实验结果及其抗攻击性能分析。



Fig.3 Watermark

图 3 水印图像



Fig.4 Some examples of the proposed watermarking approach

图 4 本文算法水印嵌入的一些实例

从图 4 可以发现,视觉效果上嵌入水印前后两图没有什么差别,这说明该算法嵌入水印具有很好的不可见性。同时,从原始图像与嵌入水印后图像之差图像(绝对值放大 30 倍)可以看出,水印嵌入强度在纹理区、低亮度区和高亮度区要大些,而在图像平滑区和中等亮度区相对要弱些,水印嵌入强度具有自适应调节性能。此外,本

文还对其他一些标准测试图像(512×512×8)进行了水印嵌入不可见性实验,都取得了很好的效果(实验结果在表 1 中给出),证明了本文算法的有效性.由于本文的算法充分利用了 HVS 特性,含水印图像 PSNR 值甚至可以更低也不会导致视觉上的可察觉失真.

**Table 1** Experimental results of watermark invisibility on some standard gray images

**表 1** 一些标准灰度图的水印不可见性实验结果

Image	Boat	Lena	Barbara	Houses	Bridge	Couple
PSNR (dB)	38.387 4	39.118 4	39.109 6	35.076 5	36.824 6	38.348 4

下面我们针对嵌入水印后的“boat”图像进行一些抗攻击性能实验.

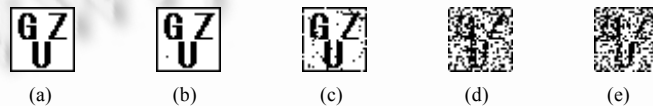
图 5(a)~(e)分别是对含水印图像进行质量因子为 90,80,70,60,50 的 JPEG 压缩后提取出的水印,恢复水印相似值分别为 1,0.9961,0.9004,0.7734 和 0.7031.可见算法能经受一定的 JPEG 有损压缩攻击.



**Fig.5** The extracted watermarks from the watermarked image after JPEG compression

图 5 含水印图像经 JPEG 压缩后提取出的水印

图 6(a)~(e)分别是嵌入水印后的“boat”图像经压缩比为 2,4,6,8,10 的小波压缩(这里采用 ACDSec 的 LuraWave 插件)后提取的水印结果,其相似值分别是 1,0.9980,0.9482,0.7393,0.7090.



**Fig. 6** The extracted watermarks of wavelet compressed version of the watermarked image

图 6 嵌入水印图像经小波压缩后提取的水印结果

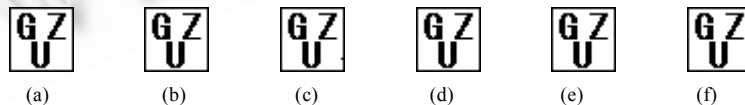
图 7(a)是含水印图像“boat”经平滑滤波后提取的水印结果,NC 值为 0.9697;图 7(b)~(e)则分别是经 3 像素运动模糊、叠加强度为 5%的高斯噪声、10%的均匀噪声、4%的椒盐噪声后再提取水印,恢复水印 NC 值分别为 0.7930,0.9424,0.8896,0.7861.



**Fig.7** Smooth filtering and noise addition

图 7 平滑滤波与噪声叠加实验

图 8(a)、图 8(b)是嵌入水印图像进行 3 次锐化和 3 次边缘锐化后再提取水印,提取水印结果相似值都高达 1;图 8(c)~(e)分别是对含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 0.9990,1,1;这证实了信号增强攻击几乎不会影响本文的算法对水印的正确提取.图 8(f)是经 16 色抖动处理后提取的水印结果,恢复结果完全正确(NC=1).



**Fig.8** The extracted watermarks from signal enhanced version of the watermarked image

图 8 经信号增强处理后提取的水印图像

图 9(a)是截去含水印图像左上角 1/4 部分,再提取水印(NC=1);图 9(b)是将含水印图像缩小至 400×400,然后放大为原图大小后再提取的水印(NC=0.7393).图 9(c)、图 9(d)则是对其进行 10%挤压操作和 10%的旋转扭曲后再提取水印,恢复水印仍是可识别的,NC 值分别为 0.7705 和 0.7939.



Fig.9 The extracted watermarks after different operations: Cropping, resampling, pinching

图 9 经裁剪、挤压和重采样处理后的提取结果

图 10(a)~(d)是含水印图像“boat”分别经垂直方向移位 2 像素、4 像素和水平移位 2 像素、4 像素后再提取的水印,抽取出的水印图像是清晰可辨的,NC 值分别为 0.9805,0.7725,0.9639,0.7832.另外,经水平、垂直同时移位 2 像素(NC=0.9189)、水平移位 2 像素/垂直移位 4 像素(NC=0.7373)以及水平移位 4 像素/垂直移位 2 像素(NC=0.7578)处理后提取的水印视觉效果仍然是可辨别的,恢复水印图像如图 10(e)~(g)所示.



Fig.10 The extracted watermarks after pixel-shift

图 10 像素移位后提取出的水印图像

最后在表 2 中给出了本文算法与同类算法<sup>[11]</sup>的一些性能比较.

Table 2 Performance comparison between the proposed approach and reference [11]

表 2 本文算法与文献[11]的性能比较

	Image-Adaptive	Complexity	Synchronization attacks	50% contrast enhancement	Sharpening	Color dithering
The proposed algorithm in this paper	(Take into account HVS) Yes	(Hilbert, DWT) Low	Pinching, rotation-distortion, pixel-shift	NC=1	3 times sharpening, NC=1	16-color dithering, NC=1
Approach described in reference [11]	No	(Multiwavelet) High	No	NC=0.9206	2 times sharpening, NC=0.9989	32-color dithering, NC=0.9869

### 3 结束语

目前关于小波域的水印算法很多,但其中针对版权保护的鲁棒公开水印算法却不多.本文在充分考虑 HVS 掩蔽特性的基础上,给出了一种基于图像分块的临界噪声阈值 JND 计算方法,并结合使用 Hilbert 扫描,实现了一种基于分块 DWT 的鲁棒自适应公开水印算法.在描述算法的基础上,给出了实验结果及其抗攻击性能分析,实验表明,本算法是有效的,在保证水印有较好的不可见性的同时,对常见图像处理操作以及裁剪、挤压、旋转扭曲、像素移位等一些几何攻击具有较强的鲁棒性,特别是对信号增强处理操作,其鲁棒性更是可观.另外,由于充分考虑了 HVS 屏蔽特性和小波系数本身具有的纹理掩盖效应,使得水印嵌入具有自适应调节特性;与此同时也增强了算法的鲁棒性.水印提取不需要利用原图像,算法具有较强的实用性.

另外,值得一提的是,本文算法稍做改动就可应用到 DCT 水印算法中去,特别是本文基于图像分块的临界噪声阈值 JND 的计算方法可以方便地移植到其他变换域甚至空域中去.

致谢 在这里,我们要特别感谢中山大学电子与通信工程系的黄继武教授,他对本文工作给予了许多切实而有意义的建议和指导,黄继武教授的建议与指导对本文工作的最终完成起着极其重要的作用.

### References:

[1] Liu RZ, Tan TN. Survey of watermarking for digital images. Journal of China Institute of Communications, 2000,21(8):39-49 (in Chinese with English abstract).  
 [2] Huang DR, Liu JF, Huang JW. An embedding strategy and algorithm for image watermarking in DWT domain. Journal of Software, 2002,13(7):1290-1297 (in Chinese with English abstract).



- [3] Podichuk CI, Zeng W. Image-Adaptive watermarking using visual models. *IEEE Journal on Special Areas in Communications*, 1998,16(4):525~539.
- [4] Pan R, Gao YX. Image watermarking method based on wavelet transform. *Journal of Image and Graphics*, 2002,7(7):667~671.
- [5] Hsu CT, Wu JL. Multiresolution watermarking for digital images. *IEEE Transactions on Circuits and Systems-II: Analog and Digital Signal Processing*, 1998,45(8):1097~1101.
- [6] Wang QS, Sun SH, Zheng WM. The fragile watermark embedding algorithm for digital audio signal. *Chinese Journal of Computers*, 2002,25(5):520~525 (in Chinese with English abstract).
- [7] Xie L, Arce GR. A blind wavelet based digital signature for image authentication. In: Theodoridis S, Pitas I, Stouraitis A, Kalouptsidis N, eds. *Proceedings of the EUSIPCO-98, Signal Processing IX: Theories and Applications*. Patras: Typorama Editions, 1998. 21~24.
- [8] Cao JG, Fowler JE, Younan NH. An image-adaptive watermark based on a redundant wavelet transform. In: Pitas I, ed. *Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing*. Thessaloniki, 2001. 277~280.
- [9] Barni M, Bartolini F, Piva A. Improved wavelet-based watermarking through pixel-wise masking. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2001,10(5):783~791.
- [10] Niu XM, Lu ZM, Sun SH. Digital watermarking technique based on multiresolution decomposition. *ACTA Electronica Sinica*, 2000,28(8):1~4 (in Chinese with English abstract).
- [11] Zhang J, Wang NC, Cao K. A multiwavelet-based blind watermarking for digital image. *Mini-Micro System*, 2002,23(2):148~152 (in Chinese with English abstract).
- [12] Griffiths JG. Table-Driven algorithms for generating space-filling curves. *Computer Aided Design*, 1985,17(1):37~41.
- [13] Gostman C, Lindenbaum M. On the metric properties of discrete space-filling curves. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1996,5(4):794~797.
- [14] Kankanhalli MS, Ramakrishnan KR. Content based watermarking of images. In: Effelsberg W, ed. *Proceedings of the ACM Multimedia 98-Electronic, the 6th ACM International Multimedia Conference*. New York: ACM Press, 1998. 61~70.
- [15] Shen LS, Zhuo L, Tian D, Wang KQ. *Video Coding and Low Bit Rate Communications*. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2001. 85~87 (in Chinese).
- [16] Xiang H, Wang LD, Lin H, Shi JY. Digital watermarking systems with chaotic sequences. In: Wong PW, Delp EJ, eds. *Security and Watermarking of Multimedia Contents. SPIE—the International Society for Optical Engineering Proceedings Series, Vol. 3657*. Bellingham, Wash, 1999. 449~457.
- [17] Yang HF, Chen XW, Gao XW. A public watermarking based on DCT compression domain. In: Beijing Electronic Technology Institute, ed. *Proceedings of the 4th China Information Hiding Workshop*. Beijing: China Machine Press, 2002. 136~144 (in Chinese with English abstract).

#### 附中文参考文献:

- [1] 刘瑞祯,谭铁牛.数字水印研究综述.通信学报,2000,21(8):39~49.
- [2] 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.软件学报,2002,13(7):1290~1297.
- [4] 潘蓉,高有行.基于小波变换的图像水印嵌入方法.中国图像图形学报,2002,7(3):667~671.
- [8] 牛夏牧,陆哲明,孙圣和.基于多分辨率的数字水印技术.电子学报,2000,28(8):1~4.
- [9] 王秋生,孙圣和,郑为民.数字音频信号的脆弱水印嵌入算法.计算机学报,2002,25(5):520~525.
- [11] 张军,王能超,曹奎.一种基于多小波的盲的数字图像水印技术.小型微型计算机系统,2002,23(2):148~152.
- [15] 沈兰荪,卓尔,田栋,汪孔桥.视频编码与低码率传输.北京:电子工业出版社,2001.85~87.
- [17] 杨恒伏,陈孝威,高新闻.基于 DCT 压缩域的公开水印算法.见:北京电子技术研究所编.全国第 4 届信息隐藏会议论文集.北京:机械工业出版社,2002.136~144.