

# 数字水印中的正交小波基<sup>1</sup>

刘九芬 黄达人 胡军全\*

(中山大学科学计算与计算机应用系 广州 510275)

(中国科学院自动化所 模式识别国家重点实验室 北京 100080)

\*(中山大学计算机科学系 广州 510275)

**摘 要** 该文主要研究了水印算法中小波基的选择和正交小波基的性质与水印稳健性的关系。研究表明: 正交小波基的正则性、消失矩阶数、支撑长度以及小波图像能量在低频带的集中程度对水印稳健性的影响极小, 同时也得到了一个有意义的结论: Haar 小波比较适合应用于图像水印。该文还研究了在水印算法中, 小波变换级数和嵌入公式的选取及其它一些问题。

**关键词** 数字水印, 正交小波基, 小波变换, 稳健性

**中图分类号** TP391.4, O177.6

## 1 引 言

数字水印 (Digital watermarking) 技术作为解决数字媒体版权保护问题的有效补充办法, 近年来引起了人们极大的兴趣与注意。由于 DWT (Discrete Wavelet Transform) 良好的空间-频域局部化特性和与人眼视觉特性相符的变换机制, 使它成为新一代静止图像压缩标准 JPEG 2000 的核心技术, 并逐渐代替 DCT (Discrete Cosine Transform) 成为变换域数字水印算法的主要工具。

DWT 用于数字水印, 首先涉及到信号的分解与合成。文献 [1] 已发现, 基于不同小波基的水印稳健性不同。因此, 同压缩编码算法中小波基的选择一样, 设计 DWT 域水印算法首先碰到的问题是使用哪一个小波基。有关图像压缩编码算法中最佳小波基的选择已讨论了许多<sup>[2,3]</sup>。而在水印算法中, 尽管已报道的 DWT 域水印算法已不少, 例如, 文献 [1] 选用 Db2 和 D9/7, 文献 [4] 选用 Haar 小波, 文献 [5] 选用 D9/7, 但对该问题的讨论却尚属空白。小波分正交和双正交两类。由于正交小波滤波器需要周期延拓, 从而在边界点造成尖锐跳变, 引入了人为的高频成分; 同时它的非对称滤波 (只有 Haar 小波除外) 和量化误差容易导致边缘错位, 形成感官误差。二者都影响压缩编码的性能, 从而使得大多压缩编码算法选用双正交小波基。而这些对编码算法来说的缺点对水印算法的性能影响并不大, 因此研究 DWT 域水印算法中的正交小波基同双正交小波基同样重要。

本文主要研究 DWT 图像水印算法中正交小波基的选择及小波本身的性质, 如正则性、消失矩阶数、支撑长度以及小波图像能量在低频带的集中程度对水印稳健性的影响。此外, 也从稳健性的角度探讨了小波变换级数和嵌入公式的选取及其它一些问题。这些研究对稳健性水印算法的设计具有重要的意义。

## 2 小波变换

### 2.1 Mallat 算法

在多尺度分析的基础上, S. Mallat 提出了用子带结构实现 DWT 的算法, 统一了子带滤波器与小波变换的计算。

<sup>1</sup> 2001-10-22 收到, 2002-07-10 改回

国家自然科学基金项目 (60133020, 60172067), 广东省自然科学基金项目 (013164), 广州市重大科技攻关项目

给出平方可和的二维信号  $\{x_{m,n}\}_{m,n \in Z}$ , 令  $c_{0,m,n} = x_{m,n}$ ,  $m, n \in Z$ , 则二维信号的小波分解公式为

$$\left. \begin{aligned} c_{j,m,n} &= 2 \sum_{k,l} h_{k-2m} h_{l-2n} c_{j-1,k,l}, & d_{j,m,n}^1 &= 2 \sum_{k,l} h_{k-2m} g_{l-2n} c_{j-1,k,l} \\ d_{j,m,n}^2 &= 2 \sum_{k,l} g_{k-2m} h_{l-2n} c_{j-1,k,l}, & d_{j,m,n}^3 &= 2 \sum_{k,l} g_{k-2m} g_{l-2n} c_{j-1,k,l} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中  $\sum_k h_k = 1$ ,  $g_k = (-1)^n h_{1-n}$ ,  $\sum_k g_k = 0$ .

## 2.2 紧支撑正交小波基的性质

由于非紧支撑小波在实际计算时必需截短, 因此人们更感兴趣的是另一类拥有紧支撑集的小波. 关于紧支尺度函数和正交小波基有两点性质<sup>[6]</sup>: (1) 除 Haar 小波外, 不具有对称性; (2) 正则性与支集的大小有关, 支集越大, 正则性越好. 到目前为止, 紧支撑正交小波基主要有 3 类: Daubechies 小波、Coiflets 小波、Symlets 小波. 而 Symlets 小波只是 Daubechies 小波族的改进, 两个小波族的特性相似, 且实际多用 Daubechies 小波<sup>[1,4,5]</sup>. 因此下面我们只讨论 Daubechies 正交小波. 需要说明的是, 这时小波对应的滤波器的长度不大于 20. 因当滤波器的长度较长时, 由 (1) 式可知, 小波分解和重构的计算复杂度较高, 而且实际中这些小波也未见应用.

Daubechies 正交小波族具有紧支集正交小波  $\psi^N$ , 它由尺度函数  $\varphi^N$  导出. 其性质如下<sup>[6]</sup>:

支撑长度:  $\psi^N$  和  $\varphi^N$  的支集分别为  $[1-N, N]$  和  $[0, 2N-1]$ , 即它们的支撑长度为  $2N-1$ .

消失矩: 小波  $\psi^N$  有  $N$  阶消失矩, 对于给定的支撑长度具有最高消失矩.

最小相位:  $\psi^N$  和  $\varphi^N$  对于给定的支撑长度具有最小相位.

正则性:  $\psi^N$  和  $\varphi^N$  的正则性随  $N$  增大而增大, 为  $\alpha N$ , 即  $\psi^N$  和  $\varphi^N$  属于  $C^{\alpha N}$ . 当  $N$  较小时,  $\alpha$  如表 1.

$\psi^N$  对应的滤波器记为 DbN ( $N$  是序号). 需要说明的是, 当  $N=1$  时,  $\psi^N$  即为 Haar 小波, 不连续.

表 1 小波支集长  $N$  与光滑度  $\alpha$  的关系

$N$	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\alpha$	0.5	0.915	1.275	1.596	1.888	2.158	2.415	2.661	2.902

## 3 小波基性质对水印稳健性的影响

稳健性是图像隐形水印最基本的要求之一. 水印应放在哪里才足够稳健? 这是水印算法必需解决的问题. 图像经小波分解后, 产生  $LH_j$ ,  $HL_j$ ,  $HH_j$  3 个高频带系列, 1 个  $LL_3$  低频带 (三级分解时). 文献 [7] 在文献 [8] 的基础上, 从理论到大量实验说明了: 在 DWT 域, 水印分量嵌入到 DWT 域低频系数稳健性最好.

众所周知, 不同的小波基具有不同的性质, 最终导致小波系数的不同分布特征和能量汇聚特性. 基于上述嵌入对策, 借助于实验手段, 本节讨论正交小波基的性质, 如正则性、消失矩阶数、支撑长度以及小波图像能量在低频带的聚集程度对水印稳健性的影响.

与应用目的和数据类型无关, 水印的稳健性取决于: (1) 嵌入信息的数据量; (2) 水印嵌入强度; (3) 载体的大小和种类. 为使不同小波基比较尽量合理, 如下实验条件在这三方面均保持相同, 并且针对不同的数据集进行测试.

(1) 我们以纹理比较简单和比较复杂的图像“Lena”(256×256×8bit)和“Baboon”(256×256×8bit)为测试图像,分别用DbN(1≤N≤10)对测试图像分别进行二、三、四级分解(考虑到水印的稳健性,不进行一级分解)。边界采用循环周期延拓(Haar小波不用延拓,除外),小波图像可完全重构,即完全消除信号的有限长度带来的边缘效应。

(2)  $W_j$  为具有正态分布  $N(0,1)$ 、长度分别为  $H^j(j=2,3,4)$  的实数随机序列,即  $W_j = \{x_i, 0 \leq i < H^j\}$ 。其中  $H^j$  为图像分解  $j$  级时小波图像低频带系数的个数。

(3) 对于不同的基、不同的测试图像、不同的分解级数,我们都把小波图像低频带系数按行扫描变成一维数组向量,记为  $V$ ; 水印  $W_j$  都按嵌入公式  $v'_i = v_i + \alpha x_i$  嵌入  $V$  得到  $V'$ , 其中拉伸因子  $\alpha$  取不同的值使得水印图像的 PSNR(Peak Signal-to-Noise Ratio) 都相同(43.5dB)。

因为攻击种类繁多,现在要解决的问题是确定一种有效的水印稳健性评估策略。StirMark<sup>[9]</sup>是一个用于测试图像水印技术稳健性的工具。基于 StirMark 实用程序,对图像水印系统提出了一个一般基准程序。我们选用 StirMark 为基准评估水印的稳健性。由于小波变换不具有旋转、平移、缩放不变性,使得水印算法抗几何攻击的能力比较差。同时由于篇幅所限,我们仅以常见的图像处理 JPEG 压缩和 Gauss 噪声作为稳健性指标。

表 2, 表 3 分别表示水印图像在 JPEG 压缩和加性 Gauss 噪声干扰下的稳健性能。总的来说,水印的可感知性和稳健性之间有一个权衡,因此要进行公平合理的比较,在评估过程中就要考虑水印的可感知性。这里我们用 PSNR 表示水印图像的客观质量。表 2 中所有 JPEG 都表示 Lena 水印图像经受 JPEG 压缩攻击后, PSNR 分别为 23.1dB, 25dB, 26.9dB, 28.1dB 和 29dB 时,抽取的水印  $W^*$  与原始水印  $W$  的相似度的均值;所有噪声都表示 Lena 水印图像经受加性 Gauss 噪声攻击后, PSNR 分别为 18.7dB, 16.3dB, 14.6dB, 13.1dB 和 12.1dB 时,抽取的水印  $W^*$  与原始水印  $W$  的相似度的均值。表 3 中所有 JPEG 都表示 Baboon 水印图像经受 JPEG 压缩攻击后, PSNR 分别为 20dB, 20.9dB, 21.8dB, 22.4dB 和 22.9dB 时,抽取的水印  $W^*$  与原始水印  $W$  的相似度的均值;所有噪声都表示 Baboon 水印图像经受加性 Gauss 噪声攻击后, PSNR 分别为 18.7dB, 16.3dB, 14.6dB, 13.2dB 和 12.2dB 时,抽取的水印  $W^*$  与原始水印  $W$  的相似度的均值。

从失真的水印图像中抽取的水印  $W^*$  与原始水印  $W$  的相似度(Similarity)的定义如下<sup>[8]</sup>:

$$\rho(W^*, W) = \frac{\sum_{i=0}^{L-1} x_i^* \cdot x_i}{\sqrt{\sum_{i=0}^{L-1} (x_i^*)^2}}$$

其中  $x_i^*$  和  $x_i$  分别代表  $W^*$  和  $W$  的分量。水印检测门限设定为 6。因若  $W^*$  与  $W$  不相关,相似度  $\rho(W^*, W) > 6$  的概率等于具有 Gauss 分布的随机变量超过其均值 6 倍方差的概率<sup>[8]</sup>。

表 2, 表 3 中,能量表示小波图像能量在低频带的聚集程度。PSNR 表示未受攻击水印图像的 PSNR。此时,如果两幅测试图像利用不同的小波基分解二级,拉伸因子  $\alpha$  都取 6.73;分解三级,  $\alpha$  都取 13.42;分解四级,  $\alpha$  取 25.48。在压缩编码算法中,各小波系数必须进行量化。这样,恢复图像与原始图像之间就会产生误差。文献[10]指出:系统的恢复均方误差,对于正交小波基来说,等于各层子小波图像的量化均方误差之和。我们认为:在基于 DWT 的水印算法中,嵌入的水印相当于小波系数的量化误差。因此对不同的正交小波基,嵌入相同强度水印的水印图像的 PSNR 应相同。从表 2, 表 3 可以看出,实验结果证实了这一点。

图 1 表示“Lena”和“Baboon”水印图像经受 JPEG 和 Gauss 噪声攻击后水印的相似度(表 2, 表 3)与正则性的关系。“Lena”和“Baboon”水印图像经受 JPEG 和 Gauss 噪声攻击后的水印的相似度和 Daubechies 正交小波的消失矩阶数与支撑长度的关系类似图 1,只是自变量发生了变化,因变量并未改变。

表 2 Lena(256×256×8bit) 实验结果

level\wavelet	Db1	Db2	Db3	Db4	Db5	Db6	Db7	Db8	Db9	Db10	
分解二级	能量	98.37	98.85	98.99	98.93	98.84	99.01	98.88	98.9	99.01	98.93
	方差	140	144	145	145	144	145	144	144	145	145
	PSNR	43.49	43.48	43.50	43.50	43.48	43.49	43.50	43.49	43.50	43.50
	JPEG	9.71	9.598	9.352	9.564	9.918	9.432	8.72	8.132	8.088	8.390
分解三级	能量	97.19	97.75	97.86	97.83	97.79	97.91	97.82	97.89	97.86	97.88
	方差	260	267	272	271	270	272	271	272	271	272
	PSNR	43.50	43.49	43.49	43.47	43.49	43.50	43.48	43.50	43.48	43.48
	JPEG	10.94	10.28	9.362	9.246	10.18	10.11	9.666	9.718	9.780	10.07
分解四级	能量	95.84	96.1	95.88	96.13	96.45	96.38	96.29	96.1	96.41	96.26
	方差	468	478	469	479	492	489	485	478	490	485
	PSNR	43.50	43.48	43.49	43.49	43.46	43.46	43.46	43.47	43.47	43.48
	JPEG	8.274	8.262	8.232	8.260	8.428	8.542	8.652	8.674	8.582	8.748
	噪声	7.228	7.364	7.332	7.904	8.632	8.792	8.398	8.01	8.014	7.986

表 3 Baboon(256×256×8bit) 实验结果

level\wavelet	Db1	Db2	Db3	Db4	Db5	Db6	Db7	Db8	Db9	Db10	
分解二级	能量	97.31	97.55	97.6	97.62	97.64	97.63	97.66	97.66	97.65	97.66
	方差	152	154	154	155	155	155	155	155	155	155
	PSNR	43.49	43.48	43.50	43.50	43.48	43.49	43.50	43.49	43.50	43.50
	JPEG	10.58	11.03	10.96	10.98	11.04	11.20	11.00	11.20	11.29	11.29
分解三级	能量	96.36	96.66	97.6	96.67	96.78	96.7	96.78	96.73	96.76	96.77
	方差	284	291	290	291	293	291	293	292	292	293
	PSNR	43.50	43.49	43.49	43.47	43.49	43.50	43.48	43.50	43.48	43.48
	JPEG	9.764	10.65	11.45	11.49	11.38	10.98	10.67	10.59	10.65	10.46
分解四级	能量	95.1	95.44	95.58	95.66	95.64	95.66	95.65	95.67	95.65	95.66
	方差	513	529	535	539	537	538	538	539	538	539
	PSNR	43.50	43.48	43.49	43.49	43.46	43.46	43.46	43.47	43.47	43.48
	JPEG	9.458	9.944	9.974	9.818	9.624	9.426	9.378	9.222	8.996	9.142
	噪声	7.262	7.244	7.212	7.772	8.464	8.518	8.042	7.598	7.652	7.720

从图 1 可以看出, 无论哪一级分解, 无论受 JPEG 压缩攻击还是受 Gauss 噪声攻击, 无论是纹理比较简单的图像“Lena”还是纹理比较复杂的图像“Baboon”, 正则性与水印检测的相似度都呈现跳跃函数关系, 而且大都呈比较激烈的振荡。特别当水印图像受 JPEG 压缩攻击后, 对“Lena”和“Baboon”来说, 正则性与相似度的函数两者大致相反。综上得出结论: Daubechies 小波的正则性对水印的稳健性并无多大影响。类似地, 我们可以发现 Daubechies 正交小波的消失矩阶数和支撑长度对水印的稳健性也无多大影响。

表 2, 表 3 中能量表示小波图像能量在低频带的聚集程度。从表中可以看出, 同一级分解小波图像能量在低频带的聚集程度差异不大。还可以看出: 小波图像能量在低频带的聚集程度对水印的稳健性并无影响。

## 4 小波基的选择

### 4.1 小波基的选择

从表 2, 表 3 中可以看出: Haar 小波性能优良, 而且 Haar 小波的支撑长度最短, 由 (1) 式经简单的计算可知, 它的分解和重构计算复杂度低于其它小波。同时 Mallat 算法是针对无限信号的, 而实际中的图像是有限的, 因此需要延拓。而对 Haar 小波而言, 则比较特殊, 边界不

需要延拓。综上, 在水印算法中, Haar 小波无疑是比较好的选择。而在编码算法中, Haar 小波由于容易出现方块效应大多不用。

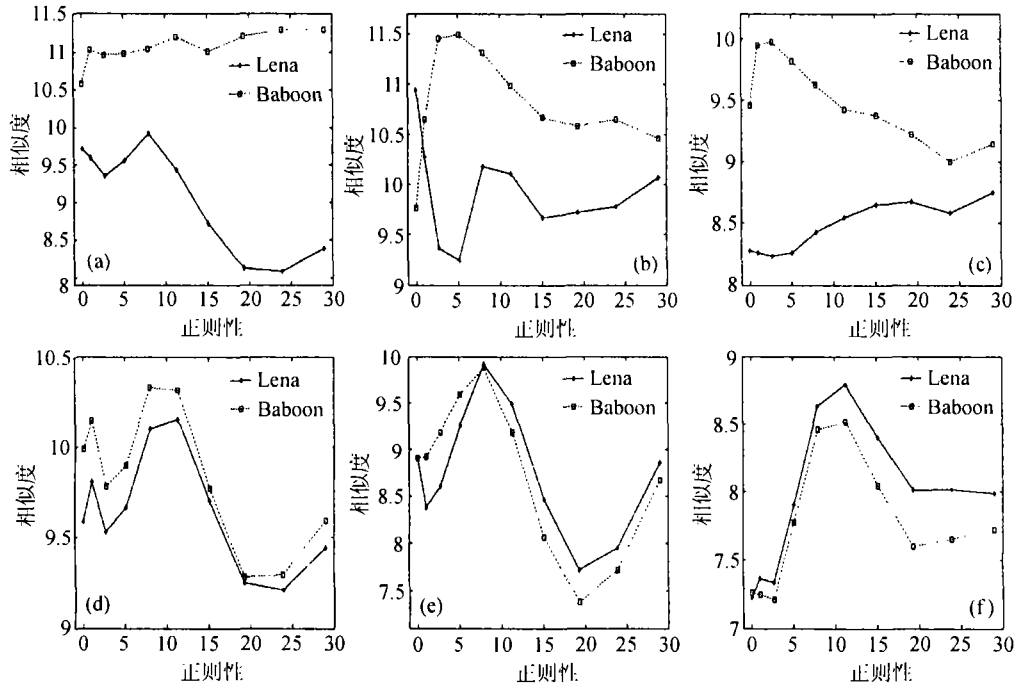


图 1 正则性与水印的稳健性

- (a) 抗 JPEG 与正则性 (二级分解) (b) 抗 JPEG 与正则性 (三级分解)  
 (c) 抗 JPEG 与正则性 (四级分解) (d) 抗噪声与正则性 (二级分解)  
 (e) 抗噪声与正则性 (三级分解) (f) 抗噪声与正则性 (四级分解)

#### 4.2 Haar 小波分解和重构计算复杂度的讨论

由于 Haar 小波在水印算法中性能优良, 我们利用 (1) 式重新设计了它的分解和重构过程, 使得它相应的计算复杂度进一步降低。

Haar 小波相应的低通滤波器为:  $\{1/2.0, 1/2.0\}$ ; 高通滤波器为:  $\{1/2.0, -1/2.0\}$ ;

Haar 小波的分解过程利用 (1) 式重新设计如下:

行分解:  $W_1[i][j] = S[2 \times i][j] + S[2 \times i + 1][j]$ ,  $W_1[i + H/2][j] = S[2 \times i][j] - S[2 \times i + 1][j]$

列分解:  $W_2[i][j] = (W_1[2 \times i][j] + W_1[2 \times i + 1][j])/2$ ,  $W_2[i + W/2][j] = (W_1[2 \times i][j] - W_1[2 \times i + 1][j])/2$ , 其中  $S$  代表将要分解的信号,  $H, W$  表示信号  $S$  的列宽和行宽。

Haar 小波分解和重构的计算复杂度: 由 Haar 小波的分解过程可知, 对  $N \times N$  点的二维离散信号进行一级小波分解时, 除需要  $2N^2$  次加法外, 由于此时信号是整型, 除法可由位移和信号最后一位的判定来代替。即若信号最后一位是 1, 除法结果是  $\pm 1/2$  加上信号向右位移一位, 反之, 除法结果只需要把信号向右位移一位。二、三、四级分解时, 由于行分解不需要乘法, 列分解比常规算法乘法次数少一半, 故本分解算法比常规算法乘法次数少  $3/4$ 。Haar 小波的重构过程可类似分解过程设计。类似的计算表明, 小波逆变换需要小波变换相同的计算量。因此 Haar 小波的一级分解与最后一级的重构避免了费时的浮点运算, 而且其它级的分解和重构比常规算法乘法次数少  $3/4$ 。故 Haar 小波分解和重构的计算复杂度极大减少, 大大提高了运算速度。

## 5 有关问题讨论

### 5.1 嵌入强度和小波分解级数

从 (1) 式可知, 小波分解是每级以 2 加权, 并注意到低通滤波器系数和为 1, 从而随着小波分解级数的增加, 低频系数的幅值以近似 2 的倍数增长。而水印编码可看为在强背景 (原始图像) 下叠加一个弱信号 (水印), 只要叠加的信号低于对比度门限, 视觉系统就无法感觉到信号的存在。根据 Weber 定律<sup>[11]</sup>, 对比度门限与背景信号的幅值成比例。这就意味着随着小波分解级数的增加, 嵌入水印的强度就可以以近似 2 的倍数增加。例如, 本文嵌入公式取 (2a) 式, 两幅测试图像利用不同的小波基, 分解二级, 拉伸因子  $\alpha$  都取 6.73; 分解三级,  $\alpha$  都取 13.42; 分解四级,  $\alpha$  取 25.48。

综上所述, 随着小波分解级数的增加, 嵌入水印的强度大幅度增加, 从而水印的稳健性增强。同时, 小波分解的级数越多, 水印分量可以更好地扩散。因此在水印算法中, 应根据水印数据量的多少, 尽可能提高小波分解的级数。

### 5.2 嵌入公式

嵌入公式也影响水印的稳健性。目前常用的嵌入公式有两个:

$$v'_i = v_i + \alpha x_i \quad (2a)$$

$$v'_i = v_i(1 + \alpha x_i) \quad (2b)$$

其中  $\alpha$  为拉伸因子。本文选择了嵌入公式 (2a) 式。基于上述嵌入对策, 从稳健性的角度, 对正交小波基来说, 哪一个嵌入公式比较好? 本节试图回答这个问题。

一个有效的水印算法应具有两个性质: (1) 水印的不可见性; (2) 水印的稳健性。那么这两个嵌入公式对这两方面的影响如何呢?

(1) 嵌入公式对水印不可见性的影响。表 2, 表 3 中, 方差表示低频带的方差, 它是小波系数分布的一个度量。从表 2, 表 3 可以看出, 随着小波分解次数的增加, 低频带的方差增大, 表示小波系数分布越不均匀, 大的系数很大, 小的系数很小。若用嵌入公式 (2a) 式, 由 5.1 节可知, 随着小波分解次数的增加, 小波系数的感觉容量以方差增加的同样速度增加, 故嵌入公式 (2a) 式不影响水印的不可见性。若用嵌入公式 (2b) 式, 因为大的系数很大, 小的系数很小, 必须对大小不同的小波系数采用大小不同的伸缩因子, 否则会影响水印的不可见性。

(2) 嵌入公式对水印稳健性的影响。由于嵌入公式 (2a) 式对每个小波系数叠加相同的强度, 水印图像受攻击后, 水印分量可能都以一定的强度存在。但对嵌入公式 (2b) 式来说, 由于大的系数叠加大的强度, 小的系数叠加小的强度, 水印图像受攻击后, 小系数的水印分量可能不存在。只有在攻击强度很强的情况下, 基于嵌入公式 (2a) 式的水印分量才有可能失去, 而基于嵌入公式 (2b) 式的大系数的水印分量仍存在。但这种情况很少存在。

综上, 嵌入公式 (2a) 式是比较好的选择。实际上, 我们为此做了大量实验, 限于篇幅这里未给出实验结果。

## 6 结 论

本文主要研究了基于嵌入对策, 水印算法中小波基的选择、正交小波基的性质与水印稳健性的关系。本文也研究了在水印算法中, 从稳健性的角度, 小波变换级数和嵌入公式的选取和其它一些问题。借助于实验手段, 通过对著名的且广泛应用的 Daubechies 正交小波族进行研究, 得出如下结论:

(1) 正交小波基的正则性、消失矩阶数、支撑长度以及小波图像能量在低频带的聚集程度对水印稳健性影响极小。

(2) 基于 Haar 小波的水印的稳健性能优良; 我们重新设计它的分解和重构过程, 使它的计

算复杂度可远低于其它小波, 因此它比较适合应用于数字水印。

(3) 水印数据量影响小波变换级数。在水印算法中, 应根据水印数据量的多少, 尽可能提高小波分解的次数。

(4) 嵌入公式 (2a) 式是比较好的选择。

### 参 考 文 献

- [1] 刘九芬, 小波理论及其在图像压缩和数字水印中的应用, [博士论文], 浙江大学, 2001.
- [2] E. A. B. da Silva, M. Ghanbari, On the performance of phase wavelet transforms in low bit-rate image coding, *IEEE Trans. on Image Processing*, 1996, 5(5), 689-703.
- [3] J. D. Villasenor, B. Belzer, J. Liao, Wavelet filter evaluation for image compression, *IEEE Trans. on Image Processing*, 1995, 4(8), 1053-1060.
- [4] Xiang-Gen Xia, C. G. Boncelet, G. R. Arce, Wavelet transform based watermarking for digital images, *Optics Express*, 1998, 3(12), 497-512.
- [5] Liu Hongmei, Liu Jiufen, Huang Jiwu, *et al.*, A robust DWT-based blind data hiding algorithm, *IEEE International Symposium on Circuits and Systems 2002*, Phoenix, USA, 2002, II, 672-675.
- [6] I. Daubechies, Orthonormal bases of compactly supported wavelets. *Comm. on Pure and Applied Mathematics*, 1988, 41(12), 909-996.
- [7] Huang Daren, Liu Jiufen, Huang Jiwu, *et al.*, A DWT-based image watermarking algorithm, *Proc of IEEE ICME*, Tokyo, Japan, 2001, 429-432.
- [8] Cox. J. Killian, F. T. Leighton, T. Shamoan, Secure spread spectrum watermarking for multimedia, *IEEE Trans. on Image Processing*, 1997, 6(12), 1673-1687.
- [9] F. A. P. Petitcolas, M. G. Kuhn, StirMark. <http://www.cl.cam.ac.uk/~fapp2/watermarking/benchmark/>, 1999.
- [10] 李涛, 俞斯乐, 基于小波变换的图像编码中的噪声分析和优化比特分配, *中国图像图形学报*, 1997, 2(8,9), 549-553.
- [11] C. Gonzalez, P. Wintz, *Digital Image Processing, Second Edition*, IEEE Press: Piscataway, NJ, USA, Addison-Wesley Publishing Co., 1987, Chapter 2.

## THE ORTHOGONAL WAVELET BASES FOR DIGITAL WATERMARKING

Liu Jiufen    Huang Daren    Hu Junquan\*

(*Dept. of Sci. Computation and Comp. Appl., Zhongshan Univ., Guangzhou 510275, China*)

(*NLPR, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*)

(\**Dept. of Computer Science, Zhongshan University, Guangzhou 510275, China*)

**Abstract** In this paper, based on an embedding strategy for watermarking in DWT domain, the influence of characteristics of orthogonal wavelet for the robustness of watermarking and the selection of wavelet bases are mainly investigated. The results show the features like regularity, number of vanishing moments, filter length and the degree of energy collecting in the low frequency subband do not have any important impact on the robustness for watermarking. Meanwhile a significant conclusion that wavelet Haar is the most suitable for digital watermarking is got. Wavelet decomposed levels and watermarking embedding formula are also addressed.

**Key words** Digital watermarking, Orthogonal wavelet bases, Wavelet transform, Robustness

刘九芬: 女, 1963年生, 副教授, 研究方向: 小波理论及其应用, 信息隐藏与数字水印。

黄达人: 男, 1945年生, 教授, 研究方向: 小波理论及其应用, 信息隐藏与数字水印。

胡军全: 男, 1977年生, 博士生, 研究方向: 信息隐藏与数字水印。