

小波变换中边界问题对水印算法性能影响的研究

王 刚 饶妮妮

(电子科技大学生命科学与技术学院 成都 610054)

摘 要 在众多的数字水印算法中,基于离散小波变换的方案得到了广泛应用.然而小波变换中的边界问题通常会对水印的提取产生影响.通过大量分析,作者得出以下结论:对于基于离散小波变换的数字水印算法,水印应该避免嵌入小波分解后的边界系数中.理论分析和数值仿真证明了这一点.最后,作者把研究结果应用到3个现有的水印算法中,仿真结果表明改进的算法可消除边界问题的影响,从而提高原有算法的水印提取能力.

关键词 离散小波变换;边界问题;数字水印;边界数据;边界系数

中图法分类号 TP391

The Research of Border Problems' Influence on Watermarking Algorithms Based on Wavelet Transform

WANG Gang RAO Ni-Ni

(School of Life Science and Technology, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054)

Abstract Among the watermarking algorithms, the ones based on the Discrete-Time Wavelet Transform (DTWT) are widely used. However, the border problems in DTWT make it more difficult to extract the watermark for the watermarking algorithms. After studying the border problems for watermarking algorithm based on DTWT, the authors propose that the watermark had better not be embedded in the border coefficients of the sub-band, and give out the proof theoretically. Experimental results show the validity of the theorems. Then the authors applied the theorems to three watermarking algorithms. Simulations show its superiority is over the schemes neglecting the border problems.

Keywords discrete-time wavelet transform; border problems; watermarking algorithm; border data; border coefficient

1 引 言

数字水印作为一种对多媒体数据进行版权保护或内容认证的工具,令人瞩目.根据嵌入方法的不同,水印技术可以分为变换域技术^[1]和时域技术^[2-5]两类.时域水印技术易于实现,但鲁棒性较差;变换域

技术^[6-7]的基本思想是先选择图像变换后的系数,然后再把水印信号嵌入到这些系数当中去,典型的变换方法有离散余弦变换、快速傅立叶变换和离散小波变换(Discrete-Time Wavelet Transform, DTWT)等.现今的鲁棒性水印算法通常应用了人类视觉系统(Human Visual System, HVS)的特性来嵌入水印.最接近 HVS 处理图像的变换域算法就是

DTWT. 因此,近年来基于 DTWT 的数字水印算法深受广大研究学者们所重视.

在众多基于 DTWT 的数字水印算法中^[1,6,8-13],不同的算法有不同的侧重点,文献[10,13]中的算法侧重于用扩频思想结合人类视觉系统来嵌入水印;文献[11,13]侧重于盲水印(不需要原始图像)的检测;文献[1,6,12]侧重于通过量化小波系数来嵌入水印等等.不论哪一种算法,都必须修改小波系数以嵌入水印,并通过逆离散小波变换(Inverse Discrete-Time Wavelet transform, IDTWT)来重构水印图像.如果把水印嵌入到小波变换的边界系数中,就会对水印的提取造成影响.这就是所谓的“小波变换中边界问题对水印算法的影响”.

在小波变换中,如果小波滤波器的长度大于 2,必须要对图像进行延拓,以无失真地恢复原图像.通常的处理方法是对图像的边界进行延拓,常用的方法有对称延拓、周期延拓、零延拓和边界重复延拓等.其中对称延拓方法比较常用,因为它较好地避免了边界处理带来的高频噪声.所以本文以对称延拓为例讨论边界问题.同时,由于这些方法的延拓范围是一样的,因此本文得到的结论同样可以推广到其他延拓方法.

本文第 2 节介绍本研究的理论基础:小波分解与重构公式;在第 3 节,我们通过一个数据实验例子描述边界问题对水印信号提取的影响;在第 4 节,我们定义边界数据与边界系数,从理论上给出边界问题影响的范围,指出嵌入水印的合适区域,并建立 4 个有关边界问题的定理;第 5 节给出数值分析结果,以验证理论分析的正确性;在第 6 节,我们把研究结论应用到 3 个已有的算法中,仿真结果表明考虑边界问题能够有效地提高水印提取能力;最后第 7 节给出结论.

2 小波变换理论基础

用 $f(k, m)$ 表示二维信号,即图像数据,其中 k 或 m 是正整数.在小波滤波器 $h(n)$ 和 $g(n)$ 的帮助

下, $f(k, m)$ 的小波变换的分解公式为

$$\begin{cases} LL(i, l) = \sum_{k, m} h(k-2i)h(m-2l)f(k, m) \\ LH(i, l) = \sum_{k, m} h(k-2i)g(m-2l)f(k, m) \\ HL(i, l) = \sum_{k, m} g(k-2i)h(m-2l)f(k, m) \\ HH(i, l) = \sum_{k, m} g(k-2i)g(m-2l)f(k, m) \end{cases},$$

$$i, l, N \in \mathbb{Z}^+, k, m \in \mathbb{Z}, -2N+1 \leq k-2i \leq 0, -2N+1 \leq m-2l \leq 0 \quad (1)$$

在此基础上,对得到的 LL 层数据替代上式的 $f(k, m)$,就可以得到该图像的二层小波分解,依次类推可以分解到多层.小波重构公式为

$$\begin{aligned} f(k, m) = & \sum_{i, l} h(k-2i)h(m-2l)LL(i, l) + \\ & \sum_{i, l} h(k-2i)g(m-2l)LH(i, l) + \\ & \sum_{i, l} g(k-2i)h(m-2l)HL(i, l) + \\ & \sum_{i, l} g(k-2i)g(m-2l)HH(i, l), \end{aligned}$$

$$i, l, N \in \mathbb{Z}^+, k, m \in \mathbb{Z}, -2N+1 \leq k-2i \leq 0, -2N+1 \leq m-2l \leq 0 \quad (2)$$

通常来说,一层小波变换后,原始图像被分解为 $LL1, LH1, HL1$ 和 $HH1$ 四部分. $LL1$ 可被继续分解为 $LL2, LH2, HL2$ 和 $HH2$. $LL2$ 仍可继续分解. $f(k, m)$ 和 $LL1$ 之间的分解与重构关系与 $LL(n-1)$ 和 LLn 之间的相同.

对于正交小波,其分解与重构滤波器是完全相同的.通常这种小波不具有广义线性相位,而双正交小波具有广义线性相位.但是后者的分解与重构滤波器是不同的.只有“Haar”小波同时具有以上两个性质.由于它的长度只有 2,所以不经常使用.

3 边界问题对数字水印算法的影响

3.1 基于小波变换的水印算法模型

基于 DTWT 的数字水印算法通常可用图 1 来进行描述.经过小波变换以后,原始图像被分解为诸

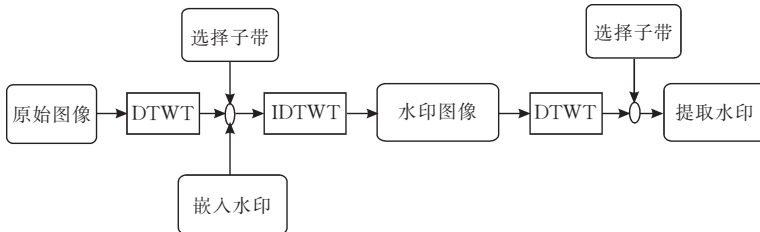


图 1 基于小波变换的数字水印算法框图

如 LLn, LHn, HLn 和 HHn 的小波子带^[14], 其中 n 表示分解层数. 无论采用什么方法, 都要选择小波子带, 然后通过修改相应子带的小波系数来嵌入水印. 这些修改过的系数称为水印系数, 并用于重构水印图像. 在水印检测过程中, 先对水印图像进行小波分解, 再选择相应的小波系数提取水印.

3.2 边界问题的影响

在没有任何攻击的情况下, “边界问题”使得水印系数与重构前的不完全相同, 即带入了噪声. 图 2 给出了这样的一个例子. 实验中选择 Daubechies^[15] 发现的小波——“dbN”小波, 其长度为 $2N$.

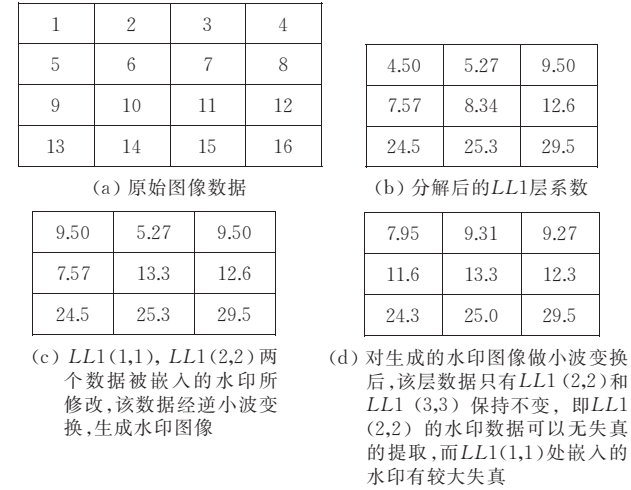


图 2 小波边界问题的影响示意图

在图 2 的例子中, 我们使用了“db2”小波, 它的长度为 4. 图 2 中, 图(a)是一幅原始图像数据, 图(b)是其 $LL1$ 层的小波系数, 我们选择 $LL1(1,1)$ 和 $LL1(2,2)$ 进行修改作为水印系数, 图(c)显示了修改后的水印系数; 然后由此重构为水印图像. 再对水印图像进行分解得到 $LL1$ 子带, 图(d)显示了重分解后的 $LL1$ 系数. 比较图(c)和(d), 我们发现两者发生了很大改变, 在 3 位有效数字下, 只有系数 $LL1(2,2)$ 和 $LL1(3,3)$ 没发生变化. 即 $LL1(2,2)$ 的水印数据可以无失真地提取, 而 $LL1(1,1)$ 处嵌入的水印有较大失真. 这将给水印提取带来噪声, 而且这个噪声显然不是他人的攻击引起的, 而是小波变换的边界问题带来的

这个数据实验表明: 并不是所有的小波系数都适合嵌入水印. 这就是“边界问题”对基于 DTWT 的水印算法的影响.

4 边界问题的理论分析

由于 $f(k, m)$ 和 $LL1$ 之间的分解与重构关系与

$LL(n-1)$ 和 LLn 之间的相同, 所以我们侧重研究一层小波分解中 $f(k, m)$ 和 $LL1$ 的边界问题. 然后再解决 n 层小波分解中 $f(k, m)$ 和 LLn 的边界问题. 研究中使用不含“0”的正交小波.

4.1 边界数据与边界系数

假设原始图像的大小为 $M \times P$, 正交小波滤波器的长度为 $2N$, 从式(1)中可以得到

$$\begin{cases} 2i-2N+1 \leq k \leq 2i \\ 2l-2N+1 \leq m \leq 2l \end{cases}, i, l \in Z^+, k, m \in Z \quad (3)$$

对于一层分解的小波系数 $WT(i, l)$ (WT 可能是 $LL1, LH1, HL1$ 或 $HH1$ 子带), 从式(1)可以得到 i, l 的变化范围:

$$\begin{cases} 1 \leq i \leq (M+2N-1)/2 \\ 1 \leq l \leq (P+2N-1)/2 \end{cases}, i, l \in Z \quad (4)$$

同理, 对于 n 层分解的小波系数 $WT(i, l)$, i, l 的变化范围为

$$\begin{cases} 1 \leq i \leq M/2^n + N \sum_{j=0}^{n-1} 2^{-j} - \sum_{j=1}^n 2^{-j} \\ 1 \leq l \leq P/2^n + N \sum_{j=0}^{n-1} 2^{-j} - \sum_{j=1}^n 2^{-j} \end{cases}, i, l \in Z \quad (5)$$

在此基础上, 我们将给出边界数据与边界系数的定义.

定义 1. 边界数据.

假设图像 $f(k, m)$ 的大小为 $M \times P$, 小波滤波器的长度为 $2N$. 当 $N > 1$ 时, 从式(3)中可以看出 $k(m)$ 将会小于 1 或大于 $M(P)$, 这样我们就面临着边界问题. 通常的处理办法是对图像的边界进行延拓. 图像中被延拓的数据我们称之为边界数据.

可以推出, 被延拓的边界数据范围变化如下:

$$\begin{cases} 1 \leq k \leq 2N-2 \text{ 或 } M-2N+3 \leq k \leq M \\ 1 \leq m \leq 2N-2 \text{ 或 } P-2N+3 \leq m \leq P \end{cases}, k, m \in Z \quad (6)$$

理论上, 延拓后的图像大小为 $(M+4N-4) \times (P+4N-4)$.

定义 2. 边界系数.

假设图像 $f(k, m)$ 的大小为 $M \times P$, 小波滤波器的长度为 $2N$. 当 $N > 1$ 时, 我们就面临边界问题. 通过分解式(1)进行 n 层小波变换, 被边界数据影响的小波系数 $WT(i, l)$ (WT 可能是 $LH1, HL1, HH1, LH2, HL2, HH2, \dots, HLn, LHn, HHn$ 或 LLn 子带之一)统称为边界系数.

对于一层小波分解边界系数: $LL1(i, l), LH1(i, l), HL1(i, l)$ 和 $HH1(i, l)$, i, l 范围变化如下:

$$\begin{cases} 1 \leq i < 2N-1 \text{ 或} \\ (M-2N+2)/2 < i \leq (M+2N-1)/2 \\ 1 \leq l < 2N-1 \text{ 或} \\ (P-2N+2)/2 < l \leq (P+2N-1)/2 \end{cases}, i, l \in \mathbb{Z} \quad (7)$$

对于 n 层小波分解边界系数: $LLn(i, l), LHn(i, l), HLn(i, l)$ 和 $HHn(i, l)$, i, l 范围变化如下:

$$\begin{cases} 1 \leq i < 2N-1 \text{ 或} \\ (M-2N+2)/2^n < i \leq M/2^{n-1} + N \sum_{j=0}^{n-1} 2^{-j} - \sum_{j=1}^n 2^{-j} \\ 1 \leq l < 2N-1 \text{ 或} \\ (P-2N+2)/2^n < l \leq P/2^{n-1} + N \sum_{j=0}^{n-1} 2^{-j} - \sum_{j=1}^n 2^{-j} \end{cases}, i, l \in \mathbb{Z} \quad (8)$$

图 3 和图 4 分别给出了边界数据和边界系数的区域。在图 3 中,浅灰色区域指边界数据,深色区域指延拓后的数据。这些延拓后的数据不属于图像,但它们是小波变换中必需的。图 4 给出了一层小波分解后的示意图,其中浅灰色区域指边界系数。

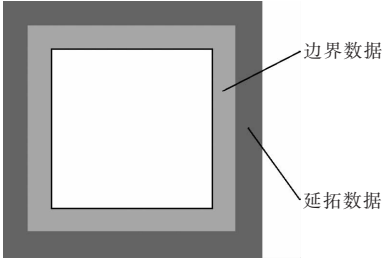


图 3 原始图像的边界数据示意图

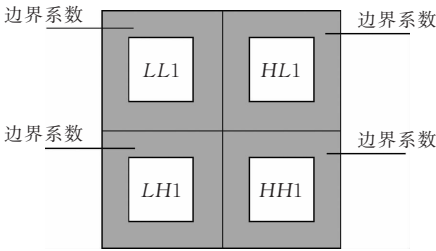


图 4 小波变换后的边界系数示意图

4.2 理论分析

通过实验分析,我们发现,如果在水印算法中边界系数不被改变,那么检测前后的这些水印系数就会相同。即水印应该嵌入图 4 所示边界系数所围绕的白色区域中。下面的定理证明了这点:水印嵌入边界系数并重新回到小波域后由于“边界问题”产生的噪声情况。

定理 1. 假设原始图像 $f(k, m)$ 的大小为 $M \times P$, 小波滤波器的长度为 $2N (N > 1)$ 。一层小波分解

后,对于小波系数 $WT(I, L)$, 如果 I, L 的变化范围如下:

$$\begin{cases} 2N-1 \leq I \leq (M-2N+2)/2 \\ 2N-1 \leq L \leq (P-2N+2)/2 \end{cases}, I, L \in \mathbb{Z} \quad (9)$$

则在此范围内,若该子带中的任何一个系数 $WT(I, L)$ 被嵌入水印,修改为 $WT'(I, L) = WT(I, L) + \Delta$, 当水印检测重新回到相应小波域 WT'' 子带后,它们的对应系数将完全相同:

$$(1) \quad WT''(I, L) = WT(I, L) + \Delta = WT'(I, L) \quad (10)$$

$$(2) \quad WT''(i, l) = WT(i, l) = WT'(i, l)_{i \neq I, l \neq L} \quad (11)$$

证明. 首先令 $WT = LL$, 则 $LL'(I, L) = LL(I, L) + \Delta$; 设重构水印图像为 $f'(k, m)$, 由小波重构式(2), 我们得到

$$\begin{aligned} f'(k, m) &= \sum_{i, l} h(k-2i)h(m-2l)LL'(i, l) + \\ &\quad \sum_{i, l} h(k-2i)g(m-2l)LH(i, l) + \\ &\quad \sum_{i, l} g(k-2i)h(m-2l)HL(i, l) + \\ &\quad \sum_{i, l} g(k-2i)g(m-2l)HH(i, l) \\ &= \sum_{i, l} h(k-2i)h(m-2l)LL(i, l) + \\ &\quad \sum_{i, l} h(k-2i)g(m-2l)LH(i, l) + \\ &\quad \sum_{i, l} g(k-2i)h(m-2l)HL(i, l) + \\ &\quad \sum_{i, l} g(k-2i)g(m-2l)HH(i, l) + \\ &\quad h(k-2I)h(m-2L)\Delta \\ &= f(k, m) + h(k-2I)h(m-2L)\Delta \\ &= f(k, m) + h(k-2I)h(m-2L)\Delta, \\ &\quad i, l, N \in \mathbb{Z}^+, k, m \in \mathbb{Z}, -2N+1 \leq k-2i \leq 0, \\ &\quad -2N+1 \leq m-2l \leq 0 \end{aligned} \quad (12)$$

由于条件(9)的限制,对于 $f'(k, m)$, k, m 变化范围为

$$k, m \in \mathbb{Z}, 2N-1 \leq k \leq M-2N+2, \\ 2N-1 \leq m \leq P-2N+2 \quad (13)$$

这就是说 $f'(k, m)$ 不属于边界数据,也意味着 $LL(I, L)$ 的改变没有影响到边界数据,延拓的数据同样不会改变。这就避免了边界问题的影响。由小波分解式(1), 我们有

$$\begin{aligned} LL''(I, L) &= \sum_{k, m} h(k-2I)h(m-2L)f'(k, m) \\ &= \sum_{k, m} h(k-2I)h(m-2L)f(k, m) + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \sum_{k,m} h(k-2I)h(m-2L)h(k-2I)h(m-2L)\Delta \\
&= LL(I,L) + \sum_{i,l=0}^{2N-1} h^2(-i)h^2(-l)\Delta \\
&= LL(I,L) + \langle h(n), h(n) \rangle^2 \Delta \quad (14)
\end{aligned}$$

再由小波的正交特性,得到

$$\langle h(n), h(n) \rangle = 1 \quad (15)$$

则 $LL''(I,L) = LL(I,L) + \Delta = LL'(I,L)$.

假设 $WT = LH, HL$ 或 HH , 同理我们也可以得到 $LL''(I,L) = LL(I,L) + \Delta = LL'(I,L)$. 所以式(10)得证.

同样, 式(11)可由小波的正交特性同样得到

$$\begin{aligned}
LL''(i+I, l+I) &= LL(i+I, l+I) \\
&= LL'(i+I, l+I)_{I,L \neq 0; I, L \in Z} \quad (16)
\end{aligned}$$

再假设 $WT = LH, HL$ 或 HH , 同理可以证得式(10)和式(11)成立. 因此, 定理 1 得证. 证毕.

定理 2. 假设原始图像 $f(k,m)$ 的大小为 $M \times P$, 小波滤波器的长度为 $2N(N > 1)$. 一层小波分解后, 对于小波系数 $WT(I,L)$, 如果 I, L 的变化范围如下:

$$1 \leq I < 2N-1 \text{ 或 } (M-2N+2)/2 < I \leq (M+2N-1)/2, \quad I \in Z \quad (17)$$

$$1 \leq L < 2N-1 \text{ 或 } (P-2N+2)/2 < L \leq (P+2N-1)/2, \quad L \in Z \quad (18)$$

则在此范围内, 若该子带中的任何一个系数 $WT(I,L)$ 被嵌入水印, 修改为 $WT'(I,L) = WT(I,L) + \Delta$, 当水印检测重新回到对应小波域 WT'' 子带后, 肯定存在 $Q, R \in Z$, 使得对应系数不相等:

$$WT''(Q,R) \neq WT'(Q,R) \quad (19)$$

证明. 首先令 $LL = WT$, 若 I 变化如下:

$$1 \leq I < 2N-1 \quad (20)$$

则 $LL'(I,L) = LL(I,L) + \Delta$.

设重构水印图像为 $f'(k,m)$, 则由小波重构式(2), 我们得到

$$\begin{aligned}
f'(k,m) &= \sum_{i,l} h(k-2i)h(m-2l)LL'(i,l) + \\
&\quad \sum_{i,l} h(k-2i)g(m-2l)LH(i,l) + \\
&\quad \sum_{i,l} g(k-2i)h(m-2l)HL(i,l) + \\
&\quad \sum_{i,l} g(k-2i)g(m-2l)HH(i,l) \\
&= f(k,m) + h(k-2I)h(m-2L)\Delta \\
&I, L, N \in Z^+, k, m \in Z, -2N+1 \leq k-2I \leq 0, \\
&\quad -2N+1 \leq m-2L \leq 0 \quad (21)
\end{aligned}$$

于是 k 的变换范围为

$$2I-2N+1 \leq k \leq 2I \quad (22)$$

由式(20)和式(22), 则必存在 K , 使得 $0 < K < 2N-1$. 由定义 1 我们有 $f'(K,m)$ 属于边界数据. 又由于在水印检测时需要将水印图像 $f'(k,m)$ 进行小波分解, 其边界数据需要延拓, 延拓后的数据 $f'(1-K,m)$ 将被修改为 $f'(K,m)$:

$$\begin{aligned}
f'(1-K,m) &= f'(K,m) \\
&= f(K,m) + h(1-2N, m-2L)\Delta \quad (23)
\end{aligned}$$

则必定存在 Q 和 R , 使得 $LL''(Q,R)$ 受到 $f'(1-K,m)$ 的影响, 而 $LL'(Q,R)$ 受到 $f(1-K,m)$ 的影响, 其中 $f(1-K,m) = f(k,m)$. 则有

$$LL''(Q,R) \neq LL'(Q,R) \quad (24)$$

至于式(17)和式(18)中的其他条件, 同理可以得到相同的结论.

再假设 $WT = LH, HL$ 或 HH , 同理可以得到相同的结论. 因此, 定理 2 得证. 证毕.

对于一层小波分解, 在修改的小波系数 $WT(I,L)$ 中, I, L 如果按照式(9)变化, 则对于重构后的水印图像 $f'(k,m)$, k, m 按照式(13)变化. 这样就使得边界数据保持不变. 对于 $n(n > 1)$ 层小波分解, 原始图像 $f(k,m)$ 分解为 LLn, LHn, HLn, HHn 等多个子带. 为了保持边界数据不变, 我们可以推导出相应的小波系数 $WT(I,L)$ 应该是边界系数的补集.

$$\begin{cases} 2N-1 \leq I \leq (M-2N+2)/2^n \\ 2N-1 \leq L \leq (P-2N+2)/2^n \end{cases}, i, l \in Z \quad (25)$$

即水印数据嵌入到此区间, 就能避免边界问题的影响.

把条件适当改变, 就可以把定理 1 和定理 2 推广到 $n(n > 1)$ 层小波分解的情况, 从而得到定理 3 和定理 4.

定理 3. 假设原始图像 $f(k,m)$ 的大小为 $M \times P$, 小波滤波器的长度为 $2N(N > 1)$. n 层小波分解后, 对于小波系数 $WT(I,L)$, 如果 I, L 的变化范围如式(25)所示, 则若子带中的任何一个系数 $WT(I,L)$ 被嵌入水印, 修改为 $WT'(I,L) = WT(I,L) + \Delta$, 当水印检测重新回到相应小波域 WT'' 子带后, 它们的对应系数将完全相同:

$$(1) WT''(I,L) = WT(I,L) + \Delta = WT'(I,L) \quad (26)$$

$$(2) WT''(i,l) = WT(i,l) = WT'(i,l)_{i \neq I, l \neq L} \quad (27)$$

定理 4. 假设原始图像 $f(k,m)$ 的大小为 $M \times P$, 小波滤波器的长度为 $2N(N > 1)$. n 层小波分解后, 对于小波系数 $WT(I,L)$, 如果 I, L 的变化范围如下:

$$1 \leq I < 2N-1 \text{ 或 } (M-2N+2)/2^n < I \leq$$

$$M/2^{-n}+N\sum_{j=0}^{n-1}2^{-j}-\sum_{j=1}^n2^{-j}, I\in Z \tag{28}$$

$$1\leq L<2N-1 \text{ 或 } (P-2N+2)/2^n<L\leq$$

$$P/2^{-n}+N\sum_{j=0}^{n-1}2^{-j}-\sum_{j=1}^n2^{-j}, L\in Z \tag{29}$$

则在此范围内,若该子带中的任何一个系数 $WT(I,L)$ 被嵌入水印,修改为 $WT'(I,L)=WT(I,L)+\Delta$,当水印检测重新回到相应小波域 WT'' 子带后,肯定存在 $Q,R\in Z$,使得对应系数不相等,即

$$WT''(Q,R)\neq WT'(Q,R) \tag{30}$$

以上 4 个定理是针对正交小波的,下面讨论双正交小波的情况.这类小波不具有式(11)和式(12)那样的正交性,所以它们的分解与重构滤波器是不同的.假设它们的分解滤波器为 $h1(n)$ 和 $g1(n)$,重构滤波器是 $h2(n)$ 和 $g2(n)$.这两组滤波器具有双正交性:

$$\begin{cases} \langle h1(n-2k),h2(n-2l)\rangle=\delta(k-l) \\ \langle g1(n-2k),g2(n-2l)\rangle=\delta(k-l) \end{cases}, k,l,n\in Z \tag{31}$$

所以定理 1 和定理 3 对于双正交小波是适合的,但通常双正交小波滤波器含有“0”元素,因此定理 2 与定理 4 对双正交小波不一定适合.此外,由于不同延拓方法的延拓范围是一样的,因此这里得到的结论同样可以推广到其他延拓方法.

综上所述,对基于 DTWT 的数字水印算法,如果需要嵌入水印的小波系数为 $WT(I,L)$,那么 I,L 的变化范围最好按照式(25)确定,这就在理论上消除了边界问题的影响.

5 计算机仿真实验

为了验证理论分析的正确性,我们做了大量的仿真实验.实验中,我们使用灰度图像“woman”(在

matlab 中,可用函数 load woman 直接调用),采用不含“0”元素的“dbN”小波及对称延拓;图像的大小是 $M\times P$,其中 $M=P=256$.

为了验证定理 1 和定理 3 的正确性,即验证 WT' 和 WT'' 两个子带的对应系数是否完全相同,我们比较了这两个子带的所有对应系数相减的绝对值的最大值 E .由于参与计算的都是浮点数,不可避免地要产生误差,我们首先计算 $\Delta=0$ 时的最大值,即系统误差.通过比较 E 与系统误差,我们可以验证定理 1 和定理 3 的正确性.同样,如果 I,L 的变化范围如式(28)和式(29)所示,也可以通过比较 E 与系统误差来验证定理 2 和定理 4 的正确性.

表 1 和表 2 分别是 1 层和 2 层小波分解的实验结果.子带的大小,用 $K\times K$ 表示.在表 1 和表 2 的 Exp1 这一项中,适合嵌入水印的子带区域的所有小波系数 $WT(I,L)$ (WT 代表 LLn)被修改为 $WT'(I,L)=WT(I,L)+\Delta(I,L)$, Δ 取 $0\sim 20$ 之间的随机数.通过比较 Exp1 与系统误差,可以发现,两者非常接近,且都接近于 0.由此验证了定理 1 和定理 3 的正确性.

为了验证定理 2 和定理 4,在表 1 和表 2 的 Exp2~Exp5 中,我们依次改变了每个子带(依次为 LL,LH,HL 和 HH)的一个边界系数: $WT'(I,L)=WT(I,L)+\Delta$,其中 $\Delta=10$. Exp2 中, $I=L=1$; Exp3 中, $I=L=q-1$; Exp4 中, $I=L=r+1$; Exp5 中,则 $I=L=K$.随着小波滤波器长度的增加,滤波器中有的元素将会接近 0,所以 Exp4 中的数据也接近于 0.从 Exp2 到 Exp5,这些数值远远大于系统误差(10 倍以上),这也说明边界系数不适合嵌入水印.即水印嵌入边界系数并重新回到小波域后由于“边界问题”将产生噪声.

表 1 一层小波分解实验

小波 dbN	长度 2N	I,L 分布(如式(25))		LL1 范围 $K\times K$	系统 误差	所有对应系数相减的绝对值的最大值 E				
		2N-1	$(M-2N+2)/2$			Exp1	Exp2	Exp3	Exp4	Exp5
db2	4	$q=3$	$r=127$	129×129	$1.94E-10$	$2.00E-10$	9.04	8.08	0.580	1.19
db3	6	$q=5$	$r=126$	130×130	$2.14E-9$	$1.98E-9$	9.99	5.37	0.060	1.84
db4	8	$q=7$	$r=125$	131×131	$3.89E-10$	$3.98E-10$	10.0	3.30	0.0070	0.17
db5	10	$q=9$	$r=124$	132×132	$5.37E-10$	$5.39E-10$	10.0	1.93	$8.39E-4$	2.78
db6	12	$q=11$	$r=123$	133×133	$4.32E-10$	$4.31E-10$	10.0	1.10	$1.03E-4$	5.59
db7	14	$q=13$	$r=122$	134×134	$4.49E-10$	$4.48E-10$	10.0	0.62	$1.27E-5$	7.61
db8	16	$q=15$	$r=121$	135×135	$9.98E-10$	$9.74E-10$	10.0	0.34	$1.59E-6$	8.82
db9	18	$q=17$	$r=120$	136×136	$1.19E-8$	$1.16E-8$	10.0	0.19	$1.98E-7$	9.46
db10	20	$q=19$	$r=117$	137×137	$1.12E-9$	$1.12E-9$	10.0	0.10	$2.48E-8$	9.76

表 2 二层小波分解实验

小波 dbN	长度 2N	I, L 分布(如式(25))		LL2 范围 K×K	系统 误差	所有对应系数相减的绝对值的最大值 E				
		2N-1	(M-2N+2)/4			Exp1	Exp2	Exp3	Exp4	Exp5
db2	4	q=3	r=63	66×66	3.58E-10	3.72E-10	9.88	12.6	0.481	5.45
db3	6	q=5	r=63	67×67	6.17E-9	6.15E-10	10.0	8.59	0.0293	2.52
db4	8	q=7	r=62	69×69	1.25E-9	1.21E-9	10.0	6.08	0.0069	9.52
db5	10	q=9	r=62	70×70	1.85E-9	1.85E-9	10.0	3.60	7.70E-4	3.79
db6	12	q=11	r=61	72×72	1.15E-9	1.15E-9	10.0	1.86	1.09E-4	9.97
db7	14	q=13	r=61	73×73	1.19E-9	1.19E-9	10.0	0.87	1.27E-5	8.69
db8	16	q=15	r=60	75×75	2.73E-9	2.72E-9	10.0	0.32	1.59E-6	10.0
db9	18	q=17	r=60	76×76	1.70E-8	1.67E-9	10.0	0.19	2.01E-7	9.83
db10	20	q=19	r=59	78×78	2.86E-9	2.86E-9	10.0	0.10	2.42E-8	10.0

6 边界问题对数字水印算法的影响

为了验证边界问题对数字水印算法的影响,我们选择三种基于 DTWT 的水印算法^[11-13],然后修改这三种算法的水印嵌入区域,使边界系数不参与水印的嵌入,也就是把水印嵌入到式(25)所示的范围内.原始图像的大小为 $M \times P$.在实验中,采用 512×512 的“Lena”灰度图像,即 $M=P=512$.

水印的鲁棒性检验采用归一化相关性 NC (Normalized Correlation)这个指标来检测,即

$$NC = \frac{\sum W W'}{\sum W^2}$$

(32)

其中, W 为原始水印, W' 为提取出来的水印. NC 值在 0 和 1 之间,其值越大,检测效果越好,当它等于 1 的时候,表示水印无损.

假设在 Wang^[11]的算法中, $LH3$ 子带的全部系数嵌入了水印;在 Hsieh^[12]的算法中, $LH2$ 和 $LH3$ 子带的全部系数嵌入了水印;在 Barni^[13]的算法中, $LH1$ 、 $HL1$ 和 $HH3$ 子带的全部系数嵌入了水印;我们的改进算法只在式(25)所示的范围内嵌入水印.仿真比较结果如表 3 所示.从中可以发现这三种算法都不同程度地受到了边界问题的影响,并且随着小波长度的增加,影响增大.由于我们的改进算法消除了边界问题的影响,使得嵌入水印的系数在检测前后相同,因此 NC 值比原来的算法要大,从而降低了水印检测难度.由此可见,在考虑了边界问题后,这三种算法检测水印的能力将会提高.

进一步,我们计算了水印嵌入边界系数并重新回到小波域后由于“边界问题”产生的噪声情况,即信噪比 SNR(Signal Noise Ratio).如表 4 所示.从中可以看到:改进后信噪比提高了 10 倍左右.这表明,我们的改进方法几乎完全消除了“边界问题”产生的噪声.

表 3 对“Lena”图像在小波域嵌入水印后,不同方法的 NC 比较

小波 名称	NC			
	改进方法	Hsieh 的方法	Wang 的方法	Barni 的方法
Haar	1	1	1	1
db2	1	0.970	0.955	0.992
db3	1	0.926	0.895	0.984
db4	1	0.888	0.844	0.975
db5	1	0.860	0.810	0.969

表 4 水印嵌入边界系数并重新回到小波域后由于“边界问题”产生的噪声情况

小波 名称	SNR					
	Hsieh 的 水印方案/dB		Wang 的 水印方案/dB		Barni 的 水印方案/dB	
	原方法	改进方法	原方法	改进方法	原方法	改进方法
db2	23.7	228	23.3	237	26.7	245
db3	21.5	216	22.1	225	26.5	234
db4	21.1	206	21.8	214	25.1	232
db5	20.6	202	21.3	210	24.8	216

7 结论和展望

小波变换可以很好地与 HVS 相结合,因此基于 DTWT 的水印算法很有研究前景.由于实际图像的长度有限,又为了无失真地重构图像,这就必须在小波分解前对图像进行延拓.但是在对嵌入水印的小波系数进行重构和再分解后,由于延拓的影响,水印系数可能会失真,这是算法本身带来的噪声.在这篇文章中,我们研究了小波变换的边界问题对水印算法的影响,得出结论——水印最好不要嵌入到边界系数中,并从理论上给予了证明.适合嵌入水印的区域如式(25)所示.实验和仿真结果证实了我们的理论.

应该指出的是,我们的定理是建立在理想条件下的——水印图像没有丝毫改变.一般来讲,我们需要对嵌入水印后的图像进行四舍五入处理,使得图像数据保持整数.四舍五入带来的误差不可避免地要传入到小波系数中.我们将来的研究重点要放在这种误差传递上,以找到更加适合小波变换的水印算法.

参 考 文 献

- [1] Wang S H, Lin Y P. Wavelet tree quantization for copyright protection Watermarking. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, 13(2): 54-165
- [2] Yeung M, Mintzer F. An invisible watermarking technique for image verification//*Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing*. Washington DC, USA, 1997: 680-683
- [3] Wong P W. A public key watermark for image verification and authentication//*Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing*. Chicago, Illinois, USA, 1998: 455-459
- [4] Holliman M, Memon N. Counterfeiting attacks for block-wise independent watermarking techniques. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2000, 9(3): 432-441
- [5] Fridrich J, Goljan M, Baldoza A C. New fragile authentication watermark for images//*Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing*. Vancouver, Canada, 2000: 446-449
- [6] Kundur D, Hatzinakos D. Digital watermarking using multi-resolution wavelet decomposition//*Proceedings of the International Conference of Acoustic, Speech and Signal Processing*. Hawaii, USA, 1998: 2969-2972
- [7] Cox I J, Kilian J, Leighton F T et al. Secure Spread spectrum watermarking for multimedia. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1997, 6(12): 1673-1687
- [8] Inoue H, Miyazaki A, Yamamoto A et al. A digital watermark based on the wavelet transform and its robustness on image compression and transformation. *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, 1999, E83-A(1): 2-10
- [9] Wang H J M, Su P C, Kuo C C J. Wavelet-based digital image watermarking. *Optics Express*, 1998, 3(12): 491-496
- [10] Wolfgang R B, Delp E J. Image-adaptive watermarking using visual models. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1998, 16(4): 525-539
- [11] Wang Y, Doherty J F, Dyck R E V. A wavelet-based watermarking algorithm for ownership verification of digital images. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2002, 11(2): 77-88
- [12] Hsieh M S, Tseng D C, Huang Y H. Hiding digital watermarks using multiresolution wavelet transform. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2001, 48(5): 875-882
- [13] Barni M, Bartolini F, Piva A. Improved wavelet-based watermarking through pixel-wise masking. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2001, 10(5): 783-794
- [14] Mallat S G. A theory for multiresolution signal decomposition: The wavelet representation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1989, 11(7): 674-693
- [15] Daubechies I. Orthonormal bases of compactly supported wavelet. *Communication on Pure Applied Mathematics*, 1988, 41(7): 909-996



WANG Gang, born in 1977, Ph. D. candidate. His current research interests include biomedical signal processing and digital watermarking.

RAO Ni-Ni, born in 1963, professor, Ph. D. supervisor. Her research interests include biomedical image processing, bioinformatics and telemedicine.

Background

The work is supported by the Science and Technology Key Projection of Ministry of Education(No. 03146). In this project, digital watermarking is the main research focus, which is also a key problem in the current field of telemedicine. The research outcomes of this project will provide copyright protection or content authentication of medical images.

The research group has proposed some novel fragile and robust watermarking algorithms for medical images of telemedicine based on DTWT. It is widely accepted that robust watermarking algorithms should largely exploit the characteristics of the HVS(Human Visual System), for more effectively hiding a robust watermark. A widely used technique exhibiting a strong similarity to the way the HVS(Human Visual System) processes images is DTWT. As a matter of

fact, the next-generation image code standard JPEG2000 strongly relies on DTWT for obtaining good quality images at low coding rates. So watermarking algorithms based on DTWT play a key role.

In DTWT, the image has only a finite number of samples, and if the length of wavelet filter is more than 2, we have to extend the original image. This is a so-called border problem. The border problems' influence makes watermarking algorithms more difficult to extract the watermark. After studying the border problems for watermarking algorithm based on DTWT, the authors give the definition of border data and border coefficients for DTWT, propose that the watermark had better not be embedded in the border coefficients of the corresponding sub-band, and give out the proof theoretically in this paper.