

数字水印中的双正交小波基^{*}

刘九芬¹, 黄达人¹, 胡军全²

(1. 中山大学科学计算与计算机应用系, 广东 广州 510275;

2. 中山大学计算机科学系, 广东 广州 510275)

摘 要: 研究了 DWT 域水印算法中的双正交小波基。首先提出了双正交小波的分析与综合小波的选择标准, 并据此标准得到一些结论。然后通过对著名且广泛应用的 Daubechies 双正交滤波器 $9/7$ 、 $7/9$ 、 $5/3$ 、 $3/5$ 、 $7/5$ 、 $5/7$ 、 $9/3$ 和 $3/9$ 的稳健性能进行比较, 选出了比较适合应用于数字水印的双正交小波基。

关键词: 数字水印; 双正交小波基; 小波变换; 稳健性

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2002) 04-0001-05

随着网络技术的飞速发展, 数字媒体的安全和版权保护成为迫切需要解决的问题。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——频率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。因此, 同压缩编码算法中小波基的选择一样, 设计 DWT 域水印算法都要碰到的问题是使用哪一种小波基。到目前为止, 有关压缩编码算法中小波基的选择已讨论了许多^[1,2], 而有关水印算法中小波基的选择的讨论却尚属空白。尽管 DWT 域水印算法已不少, 文[3]选用 Db2 和 $9/7$, 文[4]选用 Haar 小波, 且文[3]已发现, 基于不同的小波基水印的稳健性不同。

双正交小波由于可以同时具备正则性、紧支性和对称性等, 被广泛应用于图像处理。它由 2 个尺度函数和 2 个小波函数组成, 分别称为分析、综合尺度函数和分析、综合小波函数。其中分析小波 (或分析尺度函数) 和综合小波 (或综合尺度函数) 的位置是对偶的, 可交换使用^[5]。于是人们不禁要问: 在双正交小波基的 2 个小波函数中, 选择哪一

个作分析小波, 哪一个作综合小波才有利于水印的稳健性? 本文试图对这一问题作出回答, 同时选出基于水印嵌入对策的适合于数字水印的最佳双正交小波基。其研究对稳健水印算法有着重要的指导意义。

1 几个紧支撑双正交小波基的性质

著名且广泛应用的双正交小波是 Daubechies 小波。Daubechies 小波^[5]分 3 类: 一类是双正交样条小波, 著名的代表是 $9/3$ 小波和 $5/3$ 小波。一类是滤波器的长度接近的双正交小波, 著名的代表是 $9/7$ 小波。一类是接近正交小波的双正交小波, 著名的代表是 $5/7$ 小波。

下面是各类代表的正则性和消失距阶数, 它们的对偶的相应性质正好与之相反。

$5/3$ 小波: 分析小波的正则性、消失距阶数分别是 0、2, 综合小波的正则性、消失距阶数分别是 1、2。

$9/3$ 小波: 分析小波的正则性、消失距阶数分别是 0.83、2, 综合小波的正则性、消失距阶数分别是 1、4。

$9/7$ 小波: 分析小波的正则性、消失距阶数分别是 1.1、4, 综合小波的正则性、消失距阶数分别是 1.7、4。

$5/7$ 小波: 分析和综合小波都连续, 但都不可导, 它们的消失距阶数都为 2。

* 收稿日期: 2001-10-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (69975011); 教育部重点科技资助项目; 广东省自然科学基金资助项目 (980442); 广州市重大科技攻关项目

作者简介: 刘九芬 (1963—), 女, 博士, 中国人民解放军信息工程大学副教授; E-mail: liu-jiufen@163.net

2 分析与综合小波交换使用

图像经小波分解后,产生 LH_j 、 HL_j 、 HH_j 三个高频带系列,一个 LL_3 低频带 (三级分解时)。其中低频带表示由小波变换分解级数决定的最大尺度、最小分辨率下对原始图像的最佳逼近。它的统计特征和原图像相似,图像的大部分能量集中在此。高频带系列则分别是图像在不同尺度、不同分辨率下的细节信息。

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?在 DWT 域,不同的小波系数作为水印载体有不同的稳健性。文[3]在文[6]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。

2.1 分析与综合小波的选择标准

从稳健性的角度,在双正交小波基的 2 个小波函数中,应该选择哪一个作分析小波,哪一个作综合小波?为了选择,应该先给出选择的标准。这里提出了 2 个选择标准。

(1) 峰一峰比 PPR (peak peak ratio)。

在编码算法中,同正交小波不同,同样的量化误差,不同的双正交小波基引起的失真的大小是不同的。双正交小波的量化误差会被综合小波放大并带入重构图像中。放大的程度和范围由综合小波的长度和振荡幅度决定。为了综合地刻划综合小波的长度和振荡幅度对量化误差的放大作用,文[2]定义了一个称为 PPR 的量:

PPR= $\frac{\text{最大峰峰值}}{\text{第 2 与第 3 最大峰峰值的算术均值}}$ (1)

由上式可知,综合小波的 PPR 越大,小波变得越集中,对量化误差的放大越不显著,失真的可见度越低,视觉效果越好。

本文认为:在小波图像嵌入的水印相当于小波图像的量化误差。那么水印 (双正交小波的量化误差) 会被综合小波放大并带入水印图像中 (重构图像)。为了提高水印的稳健性,应该在视觉不可见的条件下,尽可能提高水印分量的强度。因此哪个小波对应的 PPR 大,说明在视觉不可见的情况下,该小波允许嵌入的水印的强度比较大,从而对应的水印的稳健性比较好,适合作综合小波。

(2) 嵌入相同强度水印的水印图像的 PSNR (peak signal to noise ratio)。

在用相同嵌入公式,嵌入相同强度的水印的条

件下,用双正交小波基的 2 个小波函数 f_1 和 f_2 ,用 2 个方案计算 PSNR 的值。一个方案用 f_1 作分析小波,而用 f_2 作综合小波;另一个方案把 f_1 和 f_2 的位置互换。最后应该选定 PSNR 值大的方案。因为选 PSNR 值大的方案,在视觉不可见的情况下,允许嵌入的水印的强度比较大,从而对应的水印的稳健性比较好。

2.2 一些典型小波的 PSNR、PPR

首先按公式 (1) 计算 Daubechies 双正交小波各类代表的分析小波的 PPR,结果见表 1。

表 1 一些典型小波的的分析小波的 PPR

Tab. 1 The PPRs of some wavelet bases

wavelet	9/7	7/5	9/3	3/5	7/5	5/7	3/5	5/3
PPR	1.46	1.39	1.47	1.33	1.48	1.46	1.28	1.60

现在计算嵌入相同强度水印的水印图像的 PSNR。

以图像 “Lena” (256×256×8 bits) 为测试图像,分别用 Daubechies 双正交滤波器 9/7、7/5、5/3、3/5、7/5、5/7、9/3 和 3/5 对测试图像分别进行一、二、三、四级分解。边界采用对称周期延拓,完全消除信号的有限长度带来的边缘效应,即小波图像可完全重构。

为使不同基比较尽量合理,如下实验条件在 2 种情况下均保持相同:① 水印为具有正态分布 $N(0,1)$ 、长度为 L^j ($j=1,2,3,4$) 的实数随机序列, $W=\{x_i, 0\leq i\leq L^j\}$ 。其中 L^j 分别为图像分解不同级数的小波图像低频带系数的个数;② 把低频带系数按行扫描变成一维数组向量,记为 v 。水印 W 嵌入 v 得到 v' ,各分量按如下嵌入公式:

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

其中, α 为拉伸因子。如果测试图像利用不同的基分解 1 次, α 都取 3;分解 2 次, α 都取 5.5;分解 3 次, α 取 10.5;分解 4 次, α 取 19。

表 2 是嵌入相同强度水印的水印图像的 PSNR。基于选择标准,从表 1、表 2 可以看出, 7/5 和 5/7 小波性能相差不大, 9/7 和 7/5 小波性能相当, 9/3 和 5/3 小波性能优于它们的对偶。因此我们得到结论:在水印算法中,长度相差较大的样条小波的分析与综合小波不可交换;长度接近相等的双正交小波 9/7 与接近于正交小波的双正交小波 7/5 的分析与综合小波可交换。

表 2 lena (256×256×8 bits) 实验结果

Tab 2 Lena (256×256×8 bits) experimental results

level		wavelet							
		9/7	7/9	9/3	3/9	7/5	5/7	3/5	5/3
1	PSNR	44.58	44.13	46.82	41.52	44.61	44.26	41.38	46.82
2	PSNR	44.90	45.21	48.17	40.98	45.44	44.86	40.51	48.17
3	PSNR	45.10	45.71	48.63	40.92	45.83	45.17	40.04	48.63
4	PSNR	45.30	46.23	48.97	41.43	46.23	45.53	40.25	48.97

3 小波基的选择

众所周知，不同的小波基具有不同的性质，而导致小波系数的不同分布特征，最终使得它们对应的水印有不同的稳健性。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。Stimark^[7]是一个用于测试图像水印技术稳健性的工具。基于Stimark 实用程序，对图像水印系统提出了一个一般基准程序。本文选用Stimark 为基准评估水印的稳健性。由于小波变换不具有旋转、缩放和平移不变性，使得水印算法抗几何攻击的能力比较差。这里仅以常见的图像处理 JPEG 压缩和 Gaussian 噪声作为稳健性指标。实验条件大体同 2.2，只是公式 (2) 的拉伸因子取值不同，使得不同基的水印图像 PSNR 相同。

图 1 和图 2 表示水印图像在 JPEG 压缩和加性 Gaussian 噪声干扰下的稳健性能。纵轴表示从失真的水印图像中抽取的水印与原始水印的相似度 (Similarity)^[6]：

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

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 Gaussian 分布的随机变量超过其均值 6 倍方差的概率^[9]。

从图 1 和图 2 可以看出：9/3 和 5/3 小波的稳健性能分别优于它们的对偶（注意：5/3 小波的 PPR 远大于 3/5 小波的 PPR，故在不可见的条件下，5/3 小波允许嵌入的强度远大于 3/5 小波），9/7 和 7/5 小波的稳健性能同它们的对偶相当。即实验结果也证实了本文第 2 部分的结论，说明了分析与综

合小波的选择标准行之有效。

从图 1 和图 2 还可以看出：9/7、7/9、5/7、7/5 小波的稳健性能优于 9/3、3/9、5/3、3/5 小波的稳健性能。因此得到结论：样条小波 9/3、3/9、5/3、3/5 不适合应用到数字水印，而长度接近相等的双正交小波 9/7、7/9 与接近于正交小波的双正交小波 7/5、5/7 适合应用到数字水印。并由此看来，双正交小波的正则性、消失矩阶数同水印稳健性关系不大。

4 结 论

本文研究了 DWT 域水印算法中的双正交小波基。本文首先提出了双正交小波的分析与综合小波的选择标准，根据此标准，得到结论：在水印算法中，长度相差较大的样条小波的分析与综合小波不可交换；长度接近相等的双正交小波 9/7 与接近于正交小波的双正交小波 7/5 的分析与综合小波可交换。然后对著名且广泛应用的双正交滤波器 9/7、7/9、5/3、3/5、7/5、5/7、9/3 和 3/9 的稳健性能进行了比较。实验结果也证明了前面的结论，说明了分析与综合小波的选择标准行之有效。同时得到结论：样条小波 9/3、3/9、5/3、3/5 不适合应用到数字水印，而长度接近相等的双正交小波 9/7 与接近于正交小波的双正交小波 7/5 的适合应用到数字水印。而在编码算法中，样条小波 9/3、5/3 适合应用，并且 5/3 小波是 JPEG 2000 推荐的小波。双正交小波^[8] 7/9 与接近于正交小波的双正交小波^[3] 7/5 与 5/7 均不适合应用编码算法。由实验结果看来，双正交小波的正则性、消失矩阶数同水印稳健性关系不大。

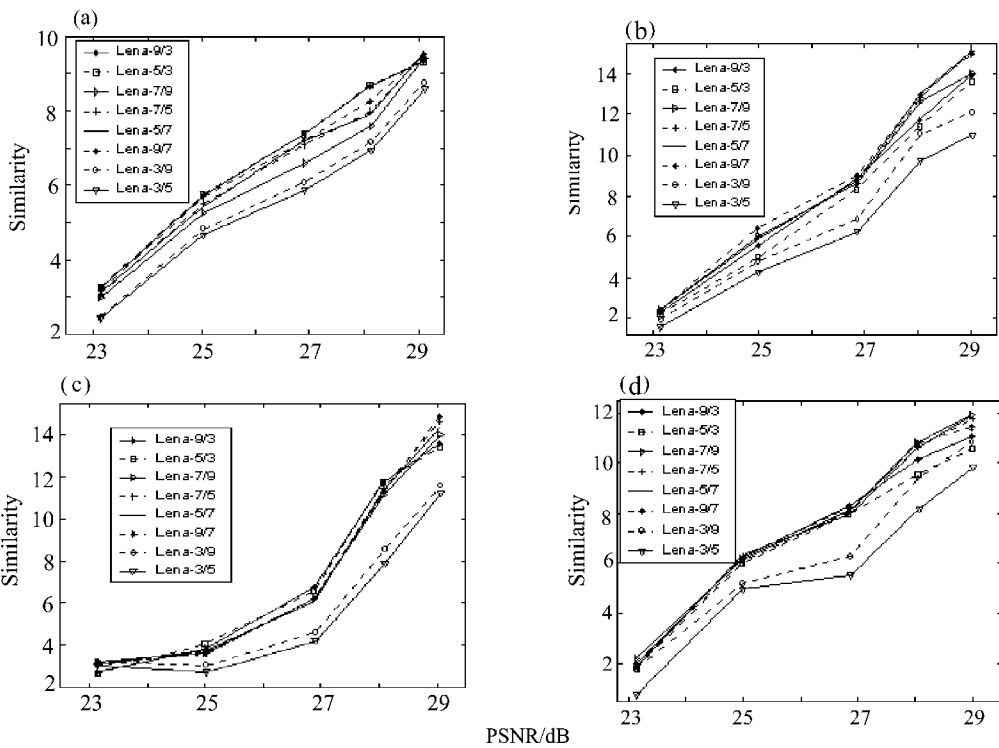


图 1 基于不同基的水印图像抗 JPEG 性能比较

Fig 1 Comparison with the performance of watermarked images using different bases against JPEG compression

一级分解实验结果: Lena 抗 JPEG (a); 二级分解实验结果: Lena 抗 JPEG (b)

三级分解实验结果: Lena 抗 JPEG (c); 四级分解实验结果: Lena 抗 JPEG (d)

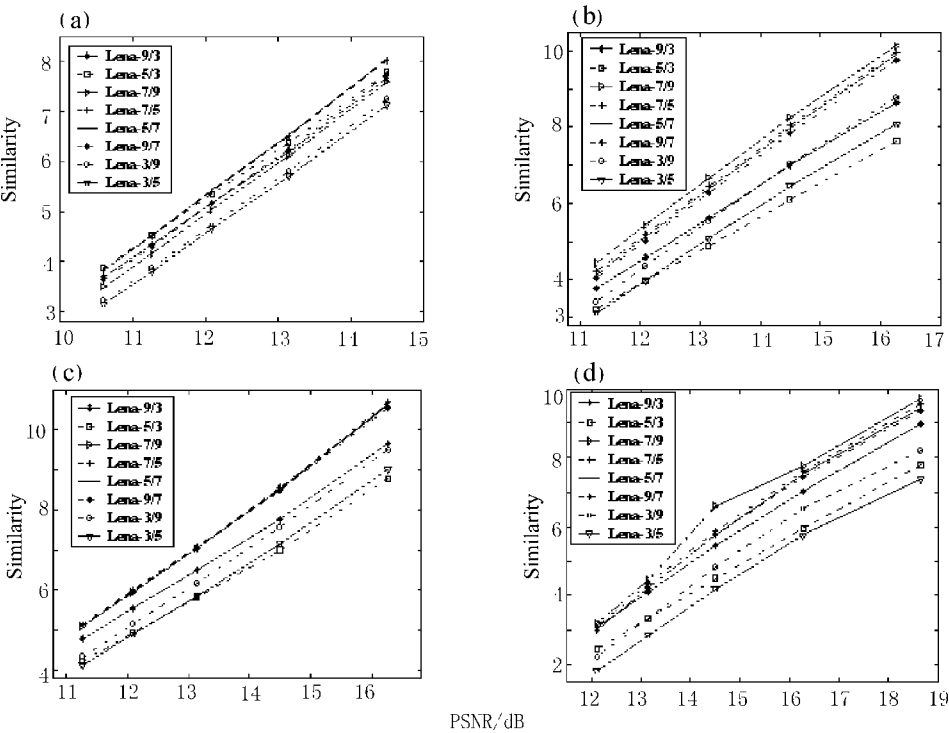


图 2 基于不同基的水印图像抗噪声性能比较

Fig 2 Comparison with the performance of watermarked images using different bases against noise

一级分解实验结果: Lena 抗噪声 (a); 二级分解实验结果: Lena 抗噪声 (b)

三级分解实验结果: Lena 抗噪声 (c); 四级分解实验结果: Lena 抗噪声 (d)

参考文献:

[1] COIFMAN R R, WICKERHAUSER M V. Entropy-based algorithms for best basis selection[J]. IEEE Trans Inform Theory, 1992, 38: 713— 718.

[2] SOLVA E A B da, GHANBARI M. On the performance of phase wavelet transforms in low bit-rate image coding[J]. IEEE Trans Image Proc, 1996, 5(5): 689— 703.

[3] 刘九芬. 小波理论及其在图像压缩和数字水印中的应用[M]. 杭州: 浙江大学, 2001.

[4] XIA X G, BONCELET G G, ARCE G R. Wavelet transform based watermarking for digital images[J]. Optics Express, 1998, 3(12): 497— 512.

[5] COHEN A, DAUBECHIES I, FEAUVEAU J G. biorthogonal bases of compactly supported wavelets[J]. Comm on Pure and Applied Mathematics, 1992, 45: 485— 560.

[6] KILLIAN G J, LEIGHTON F T, SHAMOON T. Secure spread spectrum watermarking for multimedia[J]. IEEE Trans on Image Processing, 1997, 6(12): 1673— 1687.

[7] PETITCOLAS F A P, KUHN M G. StirMark. <http://www.cl.cam.ac.uk/~fapp2/watermarking/benchmark/>. 1999— 06— 30.

[8] 王光学, 孙光宇, 曹长修. 分析与综合小波交换使用时编码性能的研究[J]. 电子科学学刊, 1999, 21(3): 408— 411.

The Biorthogonal Wavelet Filter Banks for Digital Watermarking

LIU Jiu fen¹, HUANG Da ren¹, HU Jun quan²

(1. Department of Scientific Computation and Computer Applications,
Sun Yat sen(Zhongshan) University, Guangzhou 510275, China ;

2. Department of Computer Science, Sun Yat sen(Zhongshan) University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: The biorthogonal wavelet bases for watermarking in DWT domain is investigated. Firstly, the selection criteria of analysis and synthesis wavelets are presented. And some results are obtained based on the selection criteria. Secondly, by comparing the famous Daubechies biorthogonal wavelet bases $9/7, 7/9, 5/7, 7/5, 9/3, 3/9, 5/3, 3/5$ in terms of the robustness of watermarking, biorthononal wavelet bases suitable for digital watermarking are selected.

Key words: digital watermarking; biorthogonal wavelet bases; wavelet transform; robustness