

一个多分辨率的图像水印方案¹

周亚训 叶庆卫 徐铁峰

(宁波大学电信系 宁波 315211)

摘 要 图像经小波多级分解后,各子图包含了原图像的不同信息,通过用伪随机实数修改中高频细节子图中较大的小波系数值,本文提出了一个基于小波变换的多分辨率静态灰度图像水印嵌入和检测方案.对水印图像进行退化处理模拟实验表明,嵌入的水印具有很好的鲁棒性.同时,水印的检测仅需涉及到相关的几个细节子图,减少了计算量,加快了检测速度.

关键词 图像水印,小波变换,多分辨率,互相关性

中图分类号 TN911.73

1 引 言

图像水印是一种人眼视觉不可察觉的特征信息.一般认为,在当前多媒体通信网络迅速发展,多媒体信息逐渐渗入到社会各个领域的情形下,图像水印化处理是一种解决图像著作权和版权等一系列问题的有效补充方法^[1-6].因此,对图像水印化已成为国际上研究的一个课题.

小波变换是近几年兴起的一个崭新的信号分析理论,是一种新的可达到时(空)域或频率域局部化的时(空)-频域分析方法,具有许多其它时(空)-频域分析理论所不具备的优良特性.小波变换的基本思想就是将图像进行多分辨率分解,分解成不同空间、不同频率的子图像,更加符合人眼的视觉机制.

一般,人眼的视觉较敏感于图像平滑部分信息的细微变化,而对图像边缘或纹理等部分信息的微小变化不太敏感.图像经小波变换分解成小波子图后,图像的信息得到了很好的分类,图像边缘或纹理等部分信息主要集中到中高频细节子图的较大小波系数值上.因此,适当修改这些小波系数值,就可实现某种特征信息的嵌入.基于这种思想,本文提出了一个基于小波变换的多分辨率图像水印方案.

本文第2部分对图像进行小波分解,第3部分在图像上嵌入水印,第4部分对水印进行检测,第5部分给出模拟实验结果,第6部分给出结论.

2 图像小波分解

设 $\phi(x, y)$ 是一个可分离的二维尺度函数,即

$$\phi(x, y) = \phi(x)\phi(y), \quad (1)$$

式中 $\phi(x)$ 是一维尺度函数,若 $\Psi(x)$ 是相应的小波,则可确定下列三个二维基本小波

$$\Psi^1(x, y) = \phi(x)\Psi(y), \Psi^2(x, y) = \Psi(x)\phi(y), \Psi^3(x, y) = \Psi(x)\Psi(y), \quad (2)$$

¹ 1999-03-19 收到, 1999-09-09 定稿

依据二维小波，文献 [7] 给出了二维图像信号离散小波变换的卷积形式：

$$\left. \begin{aligned} f_{2^{j+1}}^0(m, n) &= \{[f_{2^j}^0(x, y) * \phi(-x, -y)](2m, 2n)\}, \\ f_{2^{j+1}}^1(m, n) &= \{[f_{2^j}^0(x, y) * \Psi^1(-x, -y)](2m, 2n)\}, \\ f_{2^{j+1}}^2(m, n) &= \{[f_{2^j}^0(x, y) * \Psi^2(-x, -y)](2m, 2n)\}, \\ f_{2^{j+1}}^3(m, n) &= \{[f_{2^j}^0(x, y) * \Psi^3(-x, -y)](2m, 2n)\}, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中 $f_{2^0}^0(x, y)$ 代表原图像。经过离散小波变换，图像分解成四个四分之一大小的子图：水平方向、垂直方向、对角线方向的中高频部分细节子图和低频部分逼近子图，每一个子图通过间隔抽样滤波得到。逼近子图 $f_{2^{j+1}}^0(x, y)$ 仍可以完全相同的方式再分解成在尺度 2^{j+2} 上更小的子图，这样图像被多分辨率分解成不同空间和不同频率的多个子图，如图 1 所示。

考虑到二维尺度函数和小波函数是可分离的，在实际操作中，二维卷积往往被分解成在 $f_{2^j}^0(x, y)$ 的行和列上的一维卷积以加快运算速度，其流程图如图 2 所示。其中 $h_0(k)$ 是满足一定条件的离散低通滤波器脉冲响应（或称尺度向量）^[8]， $h_1(k)$ 是对应的离散高通滤波器脉冲响应（或称小波向量）， $h_1(k) = (-1)^k h_0(1 - k)$ 。

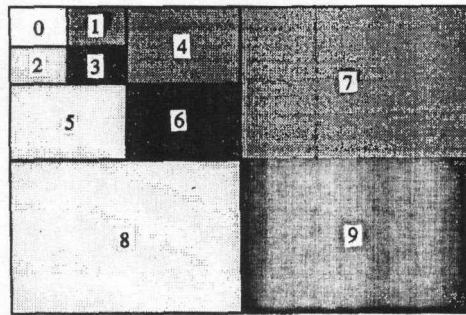


图 1 图像三级小波塔式分解图

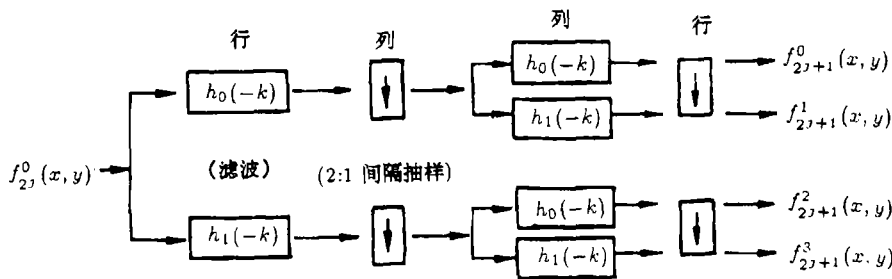


图 2 图像 DWT 分解流程图

3 图像水印嵌入

经三级小波分解后，图像的信息得到了很好的分类。为叙述方便，对图 1 各子图用 0-9 编上号，则 0 号逼近子图、1-6 号细节子图、7-9 号细节子图分别集中了图像的低频、中

频、高频部分信息。而图像的纹理、边缘部分信息主要分落在 1-9 号细节子图一些有较大值的小波系数上, 用伪随机实数修改这些小波系数, 可实现水印的嵌入。

3.1 定义

$F = [F_{ij}]_{n \times n}$, 原图像矩阵 (图像信号 $f(x, y)$ 的矩阵表示), 大小 $n \times n$, 其中 $i, j = 1, 2, \dots, n$ 。

$F' = [F'_{ij}]_{n \times n}$, 水印图像矩阵即水印嵌入到原图像 F 后形成的图像矩阵, 大小 $n \times n$, i, j 取值同上。

$F'' = [F''_{ij}]_{n \times n}$, 待测图像矩阵即水印图像 F' 经网上传输或图像处理得到的图像矩阵, 大小 $n \times n$, i, j 取值同上。

$f(t) = [f_{ij}(t)]_{nt \times nt}$, $f'(t) = [f'_{ij}(t)]_{nt \times nt}$, $f''(t) = [f''_{ij}(t)]_{nt \times nt}$ 分别表示图像矩阵 F , F' , F'' 经三级小波分解后得到的相应小波细节子图系数矩阵, 或在水印处理过程中表示相应的一维向量。其中子图大小 $nt \times nt$, 子图号 $t = 1, 2, \dots, 9$, $i, j = 1, 2, \dots, nt$ 。

$W = [W_{ij}]_{m \times m}$, 具有零均值, 方差为 1 的高斯分布伪随机实数阵, 大小 $m \times m$, 其中 $i, j = 1, 2, \dots, m$ 。

$X = [W_{i1}, W_{i2}, \dots, W_{im}]$, 伪随机实数阵 W 中第 i 行向量, 作为嵌入到图像上去的 m 个伪随机实数, $i = 1, 2, \dots, m$, 因此共有 m 种待选水印序列。

3.2 水印嵌入

对二维细节子图矩阵 $f(t) (t = 1, 2, \dots, 9)$ 元素 $f_{ij}(t)$ 按其绝对值从大至小顺序排列成一维向量:

$$f(t) = [f_1(t), f_2(t), \dots, f_k(t), \dots, f_m(t), f_{m+1}(t), \dots, f_{nt \times nt}(t)], \quad t = 1, 2, \dots, 9. \quad (4)$$

用向量 X 中 m 个伪随机实数修改向量 $f(t)$ 前 m 个元素, 即

$$f'_k(t) = f_k(t) + \alpha \cdot |f_k(t)| \cdot W_{ik}, \quad k = 1, 2, \dots, m, \quad t = 1, 2, \dots, 9 (\text{对第 } i \text{ 个水印序列。}) \quad (5)$$

式中 α 参数用来控制水印强度, α 取值大, 水印鲁棒, 但水印对原图像影响明显即水印视觉不可觉察性差; 反之, α 取值小, 水印不可觉察性好, 但水印鲁棒性弱。一般 α 值选取结合人眼视觉特性在两者之间达到一折衷。现将这 m 个 $f'_k(t)$ 替换一维向量 $f(t)$ 中原位置处 $f_k(t)$ 元素, 形成一个新的一维向量:

$$f'_k(t) = [f'_1(t), f'_2(t), \dots, f'_k(t), \dots, f'_m(t), f_{m+1}(t), \dots, f_{nt \times nt}(t)], \quad t = 1, 2, \dots, 9. \quad (6)$$

将其重新恢复成一个 $nt \times nt$ 大小的二维细节子图矩阵 $f'(t) = [f'_{ij}(t)]_{nt \times nt} (t = 1, 2, \dots, 9)$, 再经二维离散小波逆变换得到了嵌入第 i 个水印序列 m 个伪随机实数后的水印图像 F' , 图像水印嵌入过程如图 3 所示

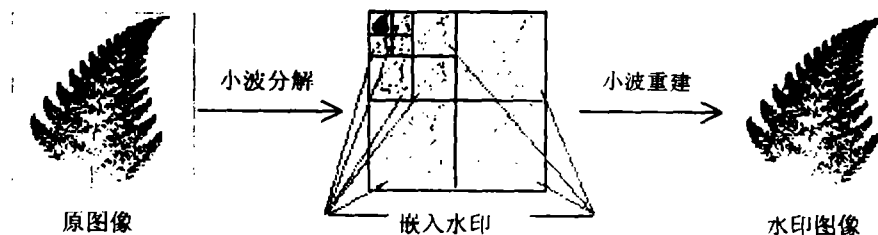


图 3 水印嵌入示意图

4 水印检测

水印检测就是在待测图像上检测出是否存在笔者嵌入的某种特征信息即伪随机实数。这可通过比较伪随机实数阵 W 中 m 个伪随机实数序列向量 X 与待测图像小波细节子图间的互相关性来判别。具体操作是将一个任意的待测图像 F'' 进行三级小波分解得到图 1 的塔式分解图, 根据实际需要计算 1-9 号子图中几个或全部细节子图与 m 个伪随机实数序列向量 X 的互相关系数。图像水印检测过程由图 4 所示。

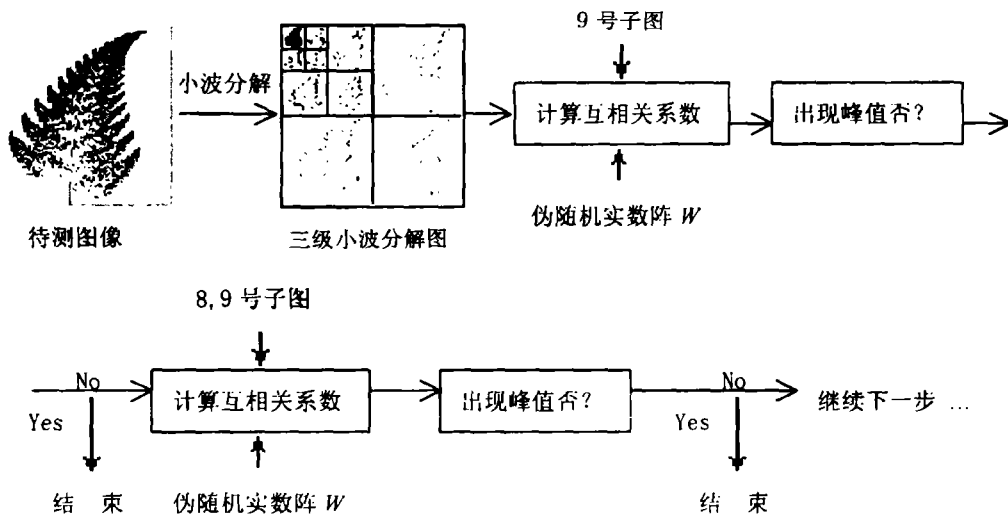


图 4 水印检测示意图

检测从高频细节子图开始, 首先, 将 9 号细节子图 $f''(9)$ 按照前面嵌入水印时元素顺序重新排列成一维向量

$$f''(9) = [f_1''(9), f_2''(9), \dots, f_k''(9), \dots, f_m''(9), f_{m+1}''(9), \dots, f_{nt \times nt}''(9)]. \quad (7)$$

选取前 m 个元素形成向量 $X''(9)$ 如下:

$$X''(9) = [f_1''(9), f_2''(9), \dots, f_k''(9), \dots, f_m''(9)]. \quad (8)$$

向量 X 和向量 $X''(9)$ 的相关性可用互相关系数 Corr 表示为

$$\text{Corr}(j) = X \bullet X''(9) = \sum_{k=1}^m W_{jk} \bullet f_k''(9), \quad (9)$$

其中 $j = 1, 2, \dots, m$ 表示 m 种不同的伪随机实数序列, 因此共有 m 个互相关系数 $\text{Corr}(j)$ 。

为了定量比较 m 个互相关系数的大小, 引入参数 Ratio , 定义

$$\text{Ratio} = \frac{|\text{Corr}(i)|}{\text{Max}(|\text{Corr}(j)|)}, \quad (j \neq i, j = 1, 2, \dots, m), \quad (10)$$

表示互相关系数 $|\text{Corr}(i)|$ 与另外 $m-1$ 个互相关系数 $|\text{Corr}(j)| (j \neq i, j = 1, 2, \dots, m)$ 中的最大值之比, 参数 Ratio 体现了第 i 个伪随机实数序列相对于其它伪随机实数序列与待测图像的相关程度。如果互相关系数 $|\text{Corr}(i)|$ 大于另外 $m-1$ 个互相关系数 $|\text{Corr}(j)|$, 即参数 Ratio 值大于 1, 可认为待测的图像上存在着笔者嵌入的第 i 个水印序列 m 个伪随机实数或者说第 i 个水印。如果参数 Ratio 值小于 1, 类似于 9 号细节子图, 继续计算 8, 9 号两个细节子图与伪随机实数序列的互相关系数:

$$\text{Corr}(j) = X \cdot [X''(9) + X''(8)] = \sum_{k=1}^m W_{jk} \cdot [f_k''(9) + f_k''(8)], \quad j = 1, 2, \dots, m. \quad (11)$$

从而得到新的参数 Ratio 值。如果此时参数 Ratio 大于 1, 说明检测到水印, 计算即可结束, 否则, 以此类推, 直至计算到 1 号细节子图。一般, 如果待测图像 F'' 退化程度较轻, 只需计算几个高频细节子图就可判别水印存在与否。如果待测图像 F'' 退化程度严重, 就需依次计算除 0 号低频逼近子图以外的其余 $9 \rightarrow 1$ 号中高频细节子图与伪随机实数序列的互相关系数。如果整个检测过程参数 Ratio 值仍然小于 1, 那么无法断定待测图像上是否存在一个笔者嵌入的水印。

5 实验结果

实验在一台 586 微机上完成, 本文选择了 Daubechies 双正交小波族中最短一组滤波器作为小波分解和重建, 其中水印参数 $\alpha = 0.4$, 嵌入的水印序列 $i = 55$, 伪随机实数水印序列及每一序列伪随机数 $m = 100$ (为运算方便, 取值较小), 水印图像质量的客观评价采用峰值信噪比。

图 5(a) 是一个 256 灰度级羊齿叶图 (128×128), 图 5(b) 是根据第 3 节原理在原图上嵌入 m 个伪随机实数后得到的水印图像, 其视觉主观效果很好。图 5(c)、5(d) 是对水印图像 5(b) 进行中值滤波 (3×3 窗口) 和叠加“盐-辣椒”加性噪声后得到的退化水印图像。图 6 是图 5 各图实验测得的 m 个互相关系数, 可以直观地看到在原图像上不存在一个明显的峰值, 而在水印图像上检测出一个明显的峰值 (在横坐标 55 刻度处, 其中横坐标刻度代表水印序列即水印方案数, 纵坐标刻度代表互相关系数相对值), 虽然后二者得到了某种程度的退化处理。



图 5 原图及水印图像

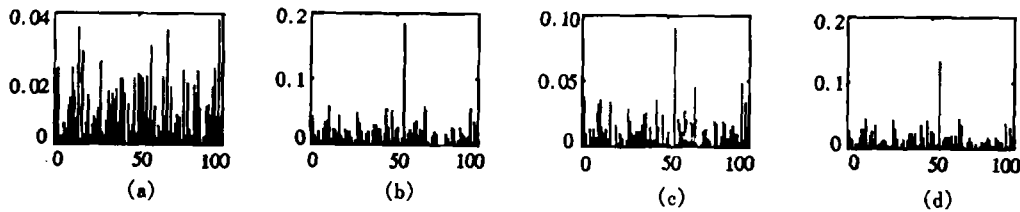


图 6 图 5 各图测得的互相关系数 (检测 9 → 1 子图: Ratio=0.36, 3.00, 1.81, 2.83)

表 1 给出了在不同水印参数 α 取值下检测不同小波细节子图得到的实验测量结果。在表中的水印参数 α 取值范围内, 嵌有伪随机实数的水印图像具有较好的客观质量和视觉主观效果, 而水印的检测仅需计算几个高频细节子图即可。即使对水印图像进行退化处理, 通过计算相关的几个高中频细节子图仍可清晰地检测出水印, 表明本文提出的水印方案具有很好的鲁棒性。

表 1 水印的实验测量结果

α 参数 数值	检测 的子图	水印图像		中值滤波后水印图像		叠加上加性噪声后水印图像	
		PSNR(dB)	Ratio 值	PSNR(dB)	Ratio 值	PSNR(dB)	Ratio 值
0.6	9 → 7	23.57	2.59	18.69	0.98	20.37	2.40
	9 → 4		2.88		1.80		2.73
	9 → 1		3.36		2.18		3.33
0.5	9 → 7	25.31	2.35	18.95	0.95	20.70	2.02
	9 → 4		2.66		1.65		2.31
	9 → 1		3.20		2.02		3.12
0.4	9 → 7	27.49	1.99	19.02	0.92	21.17	1.76
	9 → 4		2.37		1.44		2.02
	9 → 1		3.00		1.81		2.83
0.3	9 → 7	30.41	1.57	19.15	0.84	21.57	1.21
	9 → 4		2.02		1.18		1.68
	9 → 1		2.59		1.54		2.51
0.2	9 → 7	34.85	1.03	19.21	0.55	21.65	0.91
	9 → 4		1.55		0.80		1.35
	9 → 1		2.05		1.21		1.86

表 2 列出了本文水印方案与基于离散余弦变换 (DCT) 的文献 [6] 水印方案的实验比较结果, 比较是在相同的水印图像客观质量条件下进行。与文献 [6] 水印方案相比, 本文水印方案可以逐个检测小波细节子图来判断水印存在与否, 具有计算量少、检测速度快等特点, 同时水印的鲁棒性也要稍好于后者。

表 2 水印方案的比较

	检测 的子图	检测 时间 (s)	水印图像		中值滤波后水印图像		叠加上加性噪声后水印图像	
			PSNR(dB)	Ratio 值	PSNR(dB)	Ratio 值	PSNR(dB)	Ratio 值
本文水 印方案	9 → 7	8.34	27.49	1.99	19.02	0.92	21.17	1.76
	9 → 4	13.61		2.37		1.44		2.02
文献 [6] 方案	9 → 1	18.87		3.00		1.81		2.83
	整个 图像	20.28	27.46	2.35	18.77	1.46	20.97	1.99

6 结 论

利用小波的图像多分辨率分解特性, 结合人眼的视觉机制, 本文提出了一个静态灰度图像水印嵌入和检测方案。嵌入的水印是一组伪随机实数, 难于被他人仿造。同时, 本文水印的检测不需要借助原图像, 保证了原图像的安全性。而且, 水印的检测一般只涉及到待测图像的相关几个细节子图, 不需要计算整个图像, 减少了运算量。实验结果表明, 本文提出的水印方案具有易实现、易检测、稳健可靠等特点。

参 考 文 献

- [1] Pitas I. A method for signature casting on digital image. Proc. IEEE Int. Conf. on Image Processing, Lausanne, Switzerland: 1996, 3: 215-218.
- [2] Wang R B, Delp E J. A watermark for digital images. Proc. IEEE Int. Conf. on Image Processing, Lausanne, Switzerland: 1996, 3: 219-222.
- [3] Schneider M, Chang S. A robust content based digital signature for image authentication. Proc. IEEE Int. Conf. on Image Processing, Lausanne, Switzerland: 1996, 3: 227-230.
- [4] Swanson M D, Zhu B, Tewfik A H. Transparent robust image watermarking. Proc. IEEE Int. Conf. on Image Processing, Lausanne, Switzerland: 1996, 3: 211-214.
- [5] Ruanaidh J J K Q, Dowling W J, Boland F M. Phase watermarking of digital images. Proc. IEEE Int. Conf. on Image Processing, Lausanne, Switzerland: 1996, 3: 239-242.
- [6] Cox I J, Kilian J, Leighton, Shamoon T. Secure spread spectrum watermarking for images, audio and video. Proc. IEEE Int. Conf. on Image Processing, Lausanne, Switzerland: 1996, 3: 243-246.
- [7] Castleman K R 著, 朱志刚, 等译. 数字图像处理. 北京: 电子工业出版社, 1998, 261-304.
- [8] Daubechies I. Orthonormal bases of compactly supported wavelets. Commun. on Pure and Appl. Math., 1988, 41: 909-996.

A SCHEME FOR MULTIREOLUTION IMAGE WATERMARKING

Zhou Yaxun Xie Qingwei Xu Tiefeng

(Dept. of Elec. & Info., Ningbo University, Ningbo 315211)

Abstract Sub-images contain different information when the original image decomposed with wavelet. By modifying the larger wavelet coefficients of middle-high frequency range detail sub-images with pseudo-random sequence of real numbers, the paper proposes a scheme for static gray image watermarking embedding and detection based on wavelet multiresolution transform. The experimental results show that the embedding watermarking is robust enough and the watermarking detection is only relevant to some detail sub-images, it simplifies and accelerates the algorithm.

Key words Image watermarking, Wavelet transform, Multiresolution, Cross-correlation

周亚训: 男, 1965年生, 硕士, 讲师, 从事半导体器件、数字信号、图像处理等方面的教学和研究工作。

叶庆卫: 男, 1969年生, 硕士, 讲师, 从事图像处理、计算机通讯、神经网络等方面研究工作。

徐铁峰: 男, 1961年生, 博士, 副教授, 从事信号处理、数字通讯等方面的教学和研究工作。