

结合分形编码的小波域水印方法

何传江 李建国 苗婷

(重庆大学数理学院, 重庆 400030)

摘要 提出了一种结合分形编码的小波域水印方法。首先,将宿主图像分成互不重叠的子块,利用分形编码的拼贴误差对子块进行降序排列,并根据水印大小依次选取两个等长子块序列;其次,利用 Arnold 迭代变换置乱水印,按照新的嵌入公式,将置乱水印重复嵌入到所选两子块序列小波变换后的低频子图中;最后,对提取的两个水印进行融合得到最终的水印。实验结果表明,该方法隐蔽性强,安全性高,对剪切、加噪、涂抹、滤波、旋转以及 JPEG 压缩等具有较强的鲁棒性。

关键词 图像水印 分形编码 拼贴误差 融合

中图分类号: TN919.81 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2009)05-871-06

Wavelet Watermarking Technique Combined with Fractal Coding

HE Chuan-jiang, LI Jian-guo, MIAO Ting

(College of Mathematics and Physics, Chongqing University, Chongqing 400030)

Abstract A wavelet watermarking technique combined with fractal coding is proposed. First, a host image is partitioned into a set of non-overlapping square blocks. These blocks are sorted to become a descending sequence according to their collage errors which are obtained by performing baseline fractal coding, and two equal-length subsequences are chosen respectively according to the watermark size. Second, the watermark, which is first scrambled using arnold transform, is embedded into low-frequency bands in wavelet domains of distinct blocks in the two selected subsequences by a new embedding formula. Last, the watermark is the fusion of the extracted watermarks from the two selected subsequences. The experimental results show that this technique achieves good perceptual invisibility and security, and is also very robust against some image processing such as cropping, adding noise, scribbling, filtering, rotation and JPEG compression.

Keywords image watermarking, fractal coding, collage error, fusion

1 引言

随着因特网及多媒体服务的迅猛发展,如何对多媒体产品进行有效的知识产权保护越来越引起人们的重视。数字水印作为一种信息安全和数字产品版权保护的新技术,引起了人们的广泛关注^[1]。

水印嵌入的实质是以水印不可见的方式对宿主图像数据进行微小修改^[1],这种修改可以在空域里

进行^[2],也可以在变换域里进行(如 DCT(discrete cosine transform)域^[3-4],小波域^[5-7],分形域^[8])。与空域方法相比,变换域方法可以更好地利用人眼视觉系统(HVS)的视觉掩蔽特性,更好地实现水印隐蔽性和鲁棒性。因此,变换域方法成为数字水印研究的热点。

借助于分形编码,本文提出一种基于小波域的灰度水印嵌入方法。首先,把宿主图像分割为互不重叠的子块,对图像进行分形编码以获得各个子块

基金项目:重庆市科委自然科学基金计划资助项目(CSTC, 2007BB2123)

收稿日期:2007-03-19;改回日期:2007-10-08

第一作者简介:何传江(1964~),男,教授。博士生导师。主要从事分形、偏微方程与图像处理等研究。

E-mail: chuanjianghe@sina.com

的拼贴误差,按照拼贴误差从大到小的次序排列这些子块,得到一个子块序列。其次,根据水印的大小,从首项开始在子块序列中选取两个首尾相接的子列,水印被分别嵌入这两个子块序列中。水印嵌入是通过修改子块的小波域低频子图来实现的(采用新的嵌入公式)。提取水印时,对两次提取的水印进行融合处理,得到最终的水印。

2 拼贴误差

2.1 分形编码

在分形编码中,通常把图像划分为互不重叠的 $n \times n$ 子块(称为 Range 块),并在图像中确定另一类 $2n \times 2n$ 子块(称为 Domain 块)。Domain 块通过 4-邻域像素值平均收缩为 $n \times n$ 大小。类似于矢量量化编码,这种收缩子块的集合就构成下一阶段匹配搜索所需的码本(记为 Ω)。同时,为了改进图像质量,一般还要考虑 8 个等距变换。

编码阶段,对于每个 $n \times n$ Range 块 R ,确定最佳对比度因子 s 和亮度因子 g ,并搜索子块 $D = (d_{i,j}) \in \Omega$,以及最佳等距变换 M ,使得 R 与 $\hat{R} = sM(D) + gI$ 的误差最小(I 是全 1 子块)。具体说,对于输入子块 $R = (r_{i,j})$,求解极小化问题(未考虑等距变换):

$$E(R) = \min_{D \in \Omega} \min_{s, g \in R, |s| < 1} \frac{1}{n} \left(\sum_{i,j=1}^n (sd_{i,j} + g - r_{i,j})^2 \right)^{1/2} \quad (1)$$

式中, R 是实数集, $E(R)$ 给出了 \hat{R} 代替 R 产生的误差,在分形编码文献中称为拼贴误差。

解码是相对简单的迭代过程,解码图像由分形码描述的压缩变换迭代作用于任意的初始图像来得到^[8-9]。

2.2 拼贴误差与纹理边缘区域

分形编码是利用图像中不同子块之间存在的相似性(局部自相似性)来实现数据压缩的,编码效果的好坏取决于图像中存在的这种局部自相似性的程度。研究表明^[10],纹理图像通常不存在这种自相似性,对纹理图像进行分形编码将导致较大的拼贴误差。因此,有理由相信,对自然图像进行分形编码,纹理子块对应的拼贴误差应该较大。此外,边缘具有复杂的方向性,分形编码中采用的 8 个等距变换不能完全反映这些方向。因此,不难想象,含有复杂边缘方向子块对应的拼贴误差一般也应该较大。

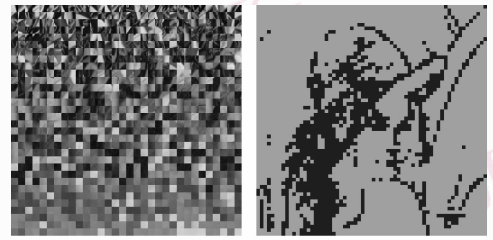
(a) 8×8 分块(b) 4×4 分块

图 1 特征块的提取示例

Fig. 1 Extraction of feature blocks

基于上述分析,可得出结论:拼贴误差可以用来描述图像的纹理和边缘区域,拼贴误差大的子块对应于图像中的纹理和边缘区域。为了验证这一结论,对几幅标准测试图像进行了实验(考虑了 8 个等距变换),图 1 给出了 $256 \times 256 \times 8$ Lena 图像的实验结果。首先,图像被分割为互不重叠的子块,通过分形编码获得每个子块的拼贴误差,然后把子块按其拼贴误差从大到小进行排序,得到赋序子块列。图 1(a)是赋序子块(8×8 分块)按从左往右、自上而下重新构成的 256×256 图像;图 1(b)中的黑色子块显示了赋序子块(按 4×4 分块)中的前 1024 个子块。从图 1 可以看出,拼贴误差大的子块确实对应于图像中的纹理和边缘区域。

顺便指出,实验还表明,对于某些图像,在描述图像的纹理边缘特征方面,拼贴误差可以弥补分形维数的某些不足——纹理边缘不同的图像子块完全可能具有相同或相近的分形维数^[11]。

3 水印方法

3.1 方法分析

数字水印技术最基本的要求是隐蔽性和鲁棒性。这两个要求是矛盾的,如何在两者之间找出一个最佳的平衡点成为设计水印嵌入方案的关键。解决这个问题的重要途径就是充分利用 HVS 的视觉掩蔽特性。基于块分类的水印嵌入就是一种有效利用 HVS 特性的方法^[3-4]。其原理是利用 HVS 的视觉掩蔽特性设计一个空域分类器,把分割图像得到的子块进行分类,水印被不同强度地嵌入到不同类的子块中(例如,纹理边缘块的嵌入强度大,其他块的嵌入强度小),从而较好地兼顾了水印的隐蔽性和鲁棒性。

根据拼贴误差可以较好地描述图像纹理和边缘

区域的特性,本文利用拼贴误差选取具有纹理边缘特征的子块作为水印的嵌入载体。首先,把宿主图像分割为互不重叠的子块,按照拼贴误差从大到小的次序排列这些子块,得到一个子块序列(从首项开始,子块的纹理边缘特征逐渐减弱,如图1(a)所示)。其次,根据水印的大小,从首项开始在子块序列中选取两个首尾相接的子块序列作为水印载体,水印按照不同强度被分别嵌入到这两个子列中(两次嵌入)。

基于小波域的水印方法通常是将图像进行 N 级小波分解,得到 $3N + 1$ 个子图 LL_N 、 HL_k 、 LH_k 、 HH_k ($k = 1, 2, \dots, N$),然后把水印嵌入在 HL_k 、 LH_k 和一些能量相对较大的 HH_k 中。尽管低频子图 LL_N 通常不被选作嵌入载体(嵌入低频子图的水印具有较强的鲁棒性,但隐蔽性较差),但是,文献[6]的算法表明,只要嵌入方法得当,低频子图 LL_N 也可以作为水印嵌入的载体。本文也采用在低频子图 LL_N 中嵌入水印的方法。

水印嵌入的实质是以水印不可见的方式对宿主图像数据进行微小修改^[1]。对于灰度水印,嵌入公式通常有如下两种^[4-5]:

$$\hat{y} = y + \alpha w \quad (2)$$

$$\hat{y} = y + \alpha(w - 128) \quad (3)$$

式中, y 、 \hat{y} 分别表示原数据和修改后的数据, w 为水印的像素值, α 为嵌入强度。本文采用一个新的嵌入公式:

$$\hat{y} = y + \alpha(w - \mu) \quad (4)$$

式中, μ 为灰度水印图像的像素均值。水印是一幅反映版权特征的灰度图像,嵌入前将其像素值减去均值进行修正。实验结果表明,与式(3)相比,式(4)可更好地减轻水印嵌入带来的图像降质,提高水印的隐蔽性。

在嵌入方式上,现有水印方法一般将水印嵌入一次(例如文献[3]~[6])。但是,研究表明^[7,12],把同一水印多次嵌入图像的不同区域能够实现更强的鲁棒性。本文采用两次嵌入方式。

在提取方式上,文献[7]对同一水印的多个版本进行算术平均来提取水印。文献[12]指出,这种无论什么攻击总是采用算术平均的方法,提取的水印达不到理想的效果。为此,文献[12]采用了加权平均的方法,即 $\hat{W}(t) = t\hat{W}_1 + (1-t)\hat{W}_2$, 其中, \hat{W}_1 和 \hat{W}_2 是提取的同一水印的两个版本, t 是权值($0 \leq t \leq 1$, 本文称为融合参数)。然后把梯度模最小的水

印作为最终提取的水印(通过搜索确定融合参数)。

本文采用上述通过加权平均提取水印的方法,但确定融合参数的方式与文献[12]不同。本文方法基于如下的实验结果:(1)对于本文的水印嵌入方法,按文献[12]方法(通过搜索确定融合参数)提取的水印达不到理想的效果;(2)对于不同的宿主图像和水印,本文嵌入方法对同一攻击对应的融合参数的最佳值是十分接近的。基于这个实验结果,将对不同宿主图像进行实验来获得某种攻击对应的最佳融合参数值。

最后,为了增强水印的安全性,同时防止剪切、涂抹等攻击使提取的水印丢失大片连续的区域,通常需要对水印进行置乱变换预处理,本文采用 Arnold 置乱变换^[4]。

3.2 水印嵌入提取方法

为了叙述方便,假设宿主图像 X 和水印图像 W 分别为 $2^M \times 2^N$ 和 $2^m \times 2^n$ 的灰度图像。嵌入过程由以下几步构成:

(1)对水印图像 W 进行 Arnold 变换^[4],迭代次数作为密钥 key1,得到置乱的水印图像 \hat{W} ,然后把 \hat{W} 分割为互不重叠的子块(为叙述方便,下面以 2×2 子块为例),将这些子块按从左往右、从上到下的顺序依次记为

$$B_i, i = 1, 2, \dots, 2^{m+n-2}$$

(2)把宿主图像 X 分成互不重叠的子块 $\{B^X\}$ (以 4×4 为例),按拼贴误差对其进行降序排列(拼贴误差大的子块在前),得到子块序列:

$$B^X_i, i = 1, 2, \dots, 2^{M+N-4}$$

从中选取前 2^{m+n-1} 个子块,它们构成一个新的序列,再把这个序列划分为 4 个等长的子列(4 类):

$$C_1: B^X_i (i = 1, 2, \dots, 2^{m+n-3})$$

$$C_2: B^X_i (i = 2^{m+n-3} + 1, \dots, 2^{m+n-2})$$

$$C_3: B^X_i (i = 2^{m+n-2} + 1, \dots, 3 \times 2^{m+n-3})$$

$$C_4: B^X_i (i = 3 \times 2^{m+n-3} + 1, \dots, 2^{m+n-1})$$

它们将作为水印(两次)嵌入的载体。

(3)第 1 次嵌入:对 C_1 、 C_2 中所有的子块 B^X_i 进行 1 级小波分解,选择低频子图 LL_1^i ,按下述公式嵌入水印:

$$\widehat{LL}_1^i = LL_1^i + \alpha_1 (B_i - \mu I), i = 1, 2, \dots, 2^{m+n-3}$$

$$\widehat{LL}_1^i = LL_1^i + \alpha_2 (B_i - \mu I),$$

$$i = 2^{m+n-3} + 1, \dots, 2^{m+n-2}$$

式中, μ 为水印图像的像素均值, 并将其作为密钥 key2 保存, I 是与 B_i 同阶的全一矩阵, α_1 、 α_2 为嵌入强度。 B_i^x 的低频子图 LL_i^x 用 \widehat{LL}_i^x 代替, 其余子图不变, 然后进行逆小波变换, 记变换结果为 \widehat{B}_i^x 。

(4) 第 2 次嵌入: 以强度 α_3 、 α_4 采用上一步的方式, 将水印再一次嵌入 C_3 、 C_4 的子块中。

经过以上步骤, 得到含水印的图像 \widehat{X} 。

水印的提取是水印嵌入的逆过程。从含水印图像 \widehat{X} 的 C_1 、 C_2 类子块中提取第 1 次嵌入的水印 \widehat{W}_1 , 从 C_3 、 C_4 类子块中提取第 2 次嵌入的水印 \widehat{W}_2 。然后, 选取 t 的最佳值 (如表 1 所示)。按公式

$$\widehat{W}_t = t \widehat{W}_1 + (1-t) \widehat{W}_2 \quad 0 \leq t \leq 1 \quad (5)$$

对 \widehat{W}_1 和 \widehat{W}_2 进行融合, 得到最终水印 \widehat{W} 。

4 实验结果

本文以 $256 \times 256 \times 8$ 标准测试图像 Lena、Zelda、Boat 和 Baboon 为实验对象 (宿主图像), 以两幅 $64 \times 64 \times 8$ 灰度图像为水印 (如图 2(a) 图 2(b) 所示)。测试性能的参数为峰值信噪比 (PSNR) 和相似度 (NC):

$$NC = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n W(i,j) \widehat{W}(i,j)}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [W(i,j)]^2}$$

实验中, 嵌入强度取值 $\alpha_1 = 0.080$ 、 $\alpha_2 = 0.070$ 、 $\alpha_3 = 0.065$ 、 $\alpha_4 = 0.055$ 。



图 2 灰度水印

Fig. 2 Gray-scale watermarks

4.1 最佳融合参数

3.1 节已指出, 针对某种攻击, 将根据对不同宿主图像进行实验来获得该攻击对应的最佳融合参数值。本节用 3 幅纹理不同的 Zelda、Boat、Baboon 为宿主图像, 以图 2(a) 为水印进行实验, 求取最佳融合参数值。

在 3 幅含水印图像未经攻击或同时经过某一攻击时, 分别提取两个不同版本的水印, 然后对其进行融合, 实验结果如下 (如表 1 所示)。(1) 当含水印

图像未经攻击时, 融合参数取 0.7 时, 融合水印的 PSNR 和 NC 同时达到最大值; (2) 当攻击分别为 JPEG、Gaussian 噪声、Poisson 噪声和 Salt-pepper 噪声时, 融合参数分别取 0.5、0.6、0.6 和 1.0 时, 融合水印的 PSNR 和 NC 同时达到最大值; (3) 当攻击为 Speckle 噪声时, 除 Boat 图像在融合参数取 0.6 时, 融合水印的 PSNR 和 NC 几乎达到最大值外, 其他两幅在融合参数取 0.6 时, 融合水印的 PSNR 和 NC 同时达到最大值; 因此, 对于 Speckle 噪声攻击, 融合参数取 0.6; (4) 当攻击分别为中值滤波和维纳滤波时, 融合参数分别取 0.2 和 0.5 时, 使得融合水印的 PSNR 和 NC 接近最好。对于其他攻击, 本文没有进行实验, 故默认最佳融合参数值为 1.0。

表 1 融合参数的最佳取值

Tab. 1 Optimal value of fusion parameters

攻击类型	噪声					滤波			其他攻击
	无	JPEG	Gaussian	Poisson	Speckle	Salt-pepper	中值	维纳	
融合参数	0.7	0.5	0.6	0.6	0.6	1.0	0.2	0.5	1.0

从表 1 可以看出, 不同攻击对应的最佳融合参数不完全相同, 因此, 可先预估攻击的类型, 然后选取相应的融合参数值提取水印。

4.2 对 Lena 图像的测试

根据融合参数的最佳取值, 用 Lena 图像和水印 (如图 2(b) 所示) 测试本文方法对相应攻击的鲁棒性, 同时对比文献 [12] 的方法。



(a) 宿主图像

(b) 含水印图像

图 3 宿主图像和含水印图像

Fig. 3 Host image and watermarked image

(1) 未经攻击

含水印 Lena 图像的 PSNR 为 40.56 dB, 视觉效果也较好 (如图 3(b) 所示); 在未经攻击时, 提取的水印 (如图 2(c) 所示) 与原始水印 (如图 2(b) 所

示)的 PSNR 为 32.96 dB,相似度为 0.999 5。

表 2 (未经攻击时)本文与文献[12]提取方法的对比

Tab.2 Performance comparison of our method and [12]

性能参数	本文方法($t=0.7$)	文献[12]方法
PSNR	32.96	30.36
NC	0.999 5	0.999 1

表 2 给出了未经攻击时,本文方法与文献[12]方法的对比。从表中可以看出,尽管 NC 几乎相同,但是本文方法提取水印的 PSNR 明显高于文献[12]方法提取的水印。

(2) JPEG 压缩

对含水印图像进行质量因子分别为 90、70、50、30 的 JPEG 压缩,对提取水印采用 $t=0.5$ 进行水印融合,融合水印见图 4(a)~图 4(d)。可以看出,随着质量因子的降低,尽管提取的水印越来越模糊,但即使在质量因子为 30 时,仍能提取出水印信息(相似度为 0.898 1)。说明本文算法对 JPEG 压缩具有较强的鲁棒性。



(a) JPEG(90) (b) JPEG(70) (c) JPEG(50) (d) JPEG(30) (e) Gaussian



(f) Possion (g) Speckle (h) Salt-pepper (i) 中值滤波 (j) 维纳滤波



(k) 涂抹 (l) 刻划 (m) 剪切 (n) 旋转 (o) 缩放

图 4 不同攻击下提取的水印

Fig.4 Extracted watermarks under various attacks

表 3 给出了 JPEG 压缩攻击后,本文方法与文献[12]方法的对比。从表中可以看出,尽管 NC 几乎相同,但是本文方法提取水印比文献[12]方法提取水印的 PSNR 平均高出 0.9 dB。

(3) 噪声攻击

图 4(e)~图 4(h)给出了含水印 Lena 图像经 Gaussian、Possion、Speckle、Salt-pepper 噪声攻击后提取的水印(Gaussian、Speckle、Salt-pepper 的强度依次

表 3 (JPEG 压缩)本文与文献[12]提取方法的对比

Tab.3 Performance comparison of our method and [12]

质量因子		90	70	50	30
本文方法 ($t=0.5$)	NC	0.994 8	0.973 7	0.944 7	0.898 1
	PSNR	22.48	15.63	12.49	9.906
文献[12]方法	NC	0.994 5	0.952 1	0.931 8	0.898 0
	PSNR	22.34	13.09	11.60	9.903

为 0.001、0.01、0.01)。对于前 3 种噪声攻击,融合参数 $t=0.6$,对于 Salt-pepper 噪声,融合参数 $t=1.0$ 。从图 4(e)~图 4(h)看出,提取的水印都较清晰,说明本文方法具有较强的抵抗噪声攻击的能力。

表 4 给出了噪声攻击后本文方法与文献[12]方法的对比。可以看出,本文采用最佳融合参数进一步提高了水印抗噪声攻击的能力。

表 4 (噪声攻击)本文与文献[12]提取方法的对比

Tab.4 Performance comparison of our method and [12]

噪声类型		Gaussian	Possion	Speckle	Salt-pepper
本文方法 ($t=0.6$)	NC	0.940 3	0.918 4	0.915 3	0.988 0 ($t=1$)
	PSNR	12.14	10.82	10.66	19.02 ($t=1$)
文献[12]方法	NC	0.938 5	0.914 0	0.910 7	0.980 4
	PSNR	12.01	10.60	10.43	16.89

(4) 滤波攻击

图 4(i)、图 4(j)给出了对含水印的 Lena 图像分别进行中值滤波(3×1)和维纳滤波(3×1)后提取的水印。融合参数采用该攻击对应的最佳值,即 0.2 和 0.5。实验结果表明,采用本文最佳融合参数提取的水印比文献[12]方法提取的水印的 PSNR 和 NC 平均分别高出 0.8 dB 和 0.06。

(5) 其他攻击

图 5(a)、图 5(b)给出了对含水印 Lena 图像进行涂沫、刻划后的图像,图 4(k)、图 4(l)为提取的水印图像(融合参数 $t=1.0$)。提取出的水印仍然是清晰可见的,这表明本文方法对涂划具有较强的鲁棒性。

图 4(m)~图 4(o)给出了对含水印 Lena 图像进行剪切(左上角 1/4)、旋转(旋转 10°)与缩放(双 3 次插值方法)后提取的水印图像(融合参数 $t=1.0$)。提出的水印仍然是不错的,表明本文方法对



(a) 涂抹

(b) 刻划

图 5 攻击后的含水印图像

Fig. 5 Attacked watermarked image

剪切、旋转与缩放也具有较强的鲁棒性。

4.3 嵌入公式对比

本文的嵌入公式不同于文献[4]、文献[5](详见3.1节)。下面实验对比3个嵌入公式的优劣,实验结果由表5给出。可以看出,在嵌入强度相同时,式(4)得到了最好的图像质量。

表 5 嵌入公式的性能对比

Tab. 5 Comparison of the characteristics for different formula

水印图像	宠物狗(图 2(a))			自制图标(图 2(b))		
嵌入公式	式(4)	式(3)	式(2)	式(4)	式(3)	式(2)
PSNR	42.38	41.92	35.38	40.56	40.28	35.16

5 结 论

借助于分形编码,本文提出了一种基于小波域的灰度水印嵌入方法。该方法有3个特点:(1)利用拼贴误差提取若干具有纹理边缘特征的子块作为水印的嵌入载体,该方法既有自适应于水印大小的优点,又充分利用了HVS的视觉掩蔽特性;(2)采用了一个新的嵌入公式,与现有文献使用的公式比较,在水印嵌入强度相同的条件下,新公式得到了最好的图像质量;(3)采用最佳融合参数提取水印既提高了水印抵抗攻击的能力,又实现了水印提取对预估攻击类型的适应性。

参考文献 (References)

1 Langelaar G C, Setyawan I, Lagendijk R L. Watermarking digital image and video data. A state-of-the-art overview [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2000, 17(5): 20-46.

2 Zhang Da-qi, Zhang Yong-hong, Kang Bao-sheng. Digital image information hiding technology based on RB curve blending [J]. Journal of Image Graphics, 2006, 11(2): 235-243. [张大奇, 张永红, 康宝生. 基于RB曲线融合的数字图像隐藏技术[J]. 中国图象图形学报, 2006, 11(2): 235-243.]

3 Huang Ji-wu, Shi Y Q, Yao Ruo-he. Adaptive image watermarking based on block classification [J]. Journal of Image Graphics, 1999, 4(8): 640-643. [黄继武, Shi Y Q, 姚若河. 基于块分类的自适应图像水印算法 [J]. 中国图象图形学报, 1999, 4(8): 640-643.]

4 Ni Rong-rong, Ruan Qiu-qi. An adaptive watermarking based on iteration mapping and image content [J]. Journal of China Institute of Communications, 2004, 25(5): 182-189. [倪蓉蓉, 阮秋琦. 一种基于迭代映射和图像内容的自适应水印算法 [J]. 通信学报, 2004, 25(5): 182-189.]

5 Zhang Ran, Chen Xiang-dong. A digital watermarking technique based on wavelet transform [J]. Journal of China Institute of Communications, 2004, 25(2): 125-130. [张冉, 陈向东. 一种基于小波变换的灰度数字水印嵌入技术 [J]. 通信学报, 2004, 25(2): 125-130.]

6 Joo S H, Suh Y H, Shin J H, et al. A new robust watermark embedding into wavelet DC component [J]. ETRI Journal, 2002, 124(5): 401-421.

7 Pan Rong, Gao You-xing. Image watermarking method based on wavelet transform [J]. Journal of Image and Graphics, 2002, 7(7): 667-671. [潘蓉, 高有行. 基于小波变换的图像水印嵌入方法 [J]. 中国图象图形学报, 2002, 7(7): 667-671.]

8 Pi M H, Li C H, Li H. A novel fractal image watermarking [J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2006, 8(3): 488-499.

9 He Chuan-Jiang, Huang Juan-juan, Li Gao-ping. Fast fractal image coding based on fractional box-counting dimension [J]. Journal of Image Graphics, 2007, 12(2): 277-282. [何传江, 黄娟娟, 李高平. 基于分数盒维数的快速分形图像编码 [J]. 中国图象图形学报, 2007, 12(2): 277-282.]

10 Oien G E, Hamzaoui R, Saupe D. On the limitations of fractal image texture coding [A]. In: Proceedings of IEEE Nordic Signal Processing Symposium [C], Espoo, Finland, 1996: 21-24.

11 Medioni G, Yasumoto Y. A note on using the fractal dimension for segmentation [A]. In: Proceedings of the Workshop on Computer Vision [C], Annapolis, MD, USA, 1984: 25-30.

12 Xiang De-sheng, Xiong Yue-shan, Zhu Geng-ming. An image adaptive Gray-scale watermarking embedding and extracting algorithm based on visual system [J]. Journal of Image Graphics, 2006, 11(7): 1026-1035. [向德生, 熊岳山, 朱更明. 基于视觉特征的灰度水印自适应嵌入与提取算法 [J]. 中国图象图形学报, 2006, 11(7): 1026-1035.]