

基于图像置乱预处理的小波域盲水印系统

彭立中 褚晓勇

(北京大学数学科学学院, 北京 100871)

摘要 在基于小波域的盲水印系统中,由于小波变换的局部性,致使水印的嵌入可能会给原始图像带来类似于图像压缩中产生的“块效应”。为了在保持强度不变的前提下进一步提高水印的不可视性,提出了一种基于图像置乱预处理的小波域盲水印算法,即先将原始图像置乱,而后再将水印嵌入到图像小波域中,以达到将水印所引入的“块效应”化整为零地分布到图像的不同部分的目的,从而在很大程度上提高了水印视觉上的“不可感知性”。试验证明,这种算法是有效的。另外,经过置乱操作的图像,小波变换后得到的小波高频系数服从高斯分布,这就使得线性相关检测在这个水印系统中能够达到最优。

关键词 小波变换 置乱 盲水印 线性相关检测

中图法分类号: TP309.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2005)03-0360-05

Blind Watermarking System in Wavelet Domain Based on the Image Scrambling

PENG Li-zhong, CHU Xiao-yong

(School of Mathematical Sciences, Peking University, Beijing 100871)

Abstract In the digital watermarking system based on the discrete wavelet transform, because of its localization, watermarking embedding often introduces some error just like “block effects” in the image compression. In order to increase the invisibility of the watermarking with the embedding strength being kept, in this paper an algorithm is presented that the image is scrambled firstly before embedding the watermark into the wavelet domain, so that “block effect” generated by the watermark can be distributed to different parts of the image and then the invisibility of the watermark is improved to a great extent. Experiments show that this idea is feasible. Moreover, it is shown from some standard images that the distribution of the wavelet coefficients of the corresponding scrambled images is approximately Gaussian, which makes the linear correlation detector in this watermarking system be optimal.

Keywords wavelet transform, scrambling, blind watermarking, linear correlation detection

1 引言

数字水印技术就是向被保护的多媒体数据中嵌入某种信息(即水印),以保护该多媒体数据所有者的权益。一个有效的水印系统至少要求满足下面两个特征:①不可感知性,也就是原始数据嵌入水印后对人的观感应该没有任何变化;②鲁棒性,即对于给定的含有水印信息的多媒体数据,非授权的个人或团体在多媒体数据价值受损的允许范围内,无法主

动或被动地剔除水印。由于图像变换域表示可以增强水印系统的鲁棒性,因此,目前通过图像的离散余弦变换(DCT),离散 Fourier 变换(DFT)以及离散小波变换(DWT)来嵌入水印的研究变得日益普通。

鉴于数字水印系统除了以上两个基本特性外,在某些应用背景下,还要求水印系统满足在不提供原始数据的前提下也能提取或检测水印,即所谓的盲水印,于是 Cox 等人提出了基于离散余弦变换的扩展频谱方法^[1],随后出现了一大批相似的方法^[2,3],即其中大部分方法嵌入规则都是基于加法规则,如用于调

基金项目:国家自然科学基金项目(90104004);国家“973”项目(1999075105)

收稿日期:2004-03-22;**改回日期:**2004-09-08

第一作者简介:彭立中(1944~),男,北京大学教授,博士生导师。1986年获瑞典斯德哥尔摩大学博士学位。主要从事调和分析、小波理论及其应用、图像处理和模式识别地研究。E-mail: lzpeng@math.pku.edu.cn; xychu@math.pku.edu.cn

整鲁棒性和不可视性之间冲突的方法就是调整加法规则中的强度系数 α 。尽管在水印盲检测过程中,人们大多采用线性相关检测,但是,Cox指出,线性相关检测只有在图像和噪声都服从高斯分布的情况下才是最佳的^[4],于是在基于线性相关检测的水印系统中,一般选取具有高斯分布的随机水印序列,但是由于自然图像是多种多样的,其统计特性也是非常复杂的,因此就不能简单地将其假设为高斯分布。早在1989年,Mallat就注意到尽管自然图像表现出复杂多样的特点,但其小波变换的分布却是非常相似的^[5],而且这种相似性是由自然图像小波变换的基本性质决定的。由于小波系数具有压缩特性,这与高斯分布是矛盾的,于是,Mallat也只能通过零均值的广义高斯分布来拟合。本文将通过置乱的方法来获取具有高斯分布的小波高频系数,以便使得盲水印的线性相关检测达到最优。

2 基于小波域的盲水印系统

小波变换的局部性和符合人类视觉模型的特性是基于小波变换的水印系统的优势。通常,图像的小波变换可得到一个低频信息(聚集了原始图像的大部分能量)和几个高频信息(聚集了原始图像纹理和边缘信息),而一般的小波域上的水印系统,考虑到不可视性,都是将水印信息嵌入到小波系数的高频部分。由于其具有局部性,致使小波变换可以提取信号的剧变点和图像的边缘,这在边缘提取和模式识别方面有着很重要的应用。反过来,这种局部性也使得当在小波系数中加入一些外来信息时,

这些信息对原始图像的影响也是局部的,这在文献[6]中已很好地反映出来。当水印嵌入的强度系数 α 增大时(可以提高水印的鲁棒性),这些局部的能量变化就会愈加明显,并将造成类似于图像压缩时增大压缩比所产生的所谓“块效应”。本文考虑到如果将这种等量的能量变化均匀地散布到图像的不同区域中去,那么每一个局部区域的能量变化就会变得很小,这样就类似于使图像感染了轻微的随机噪声。

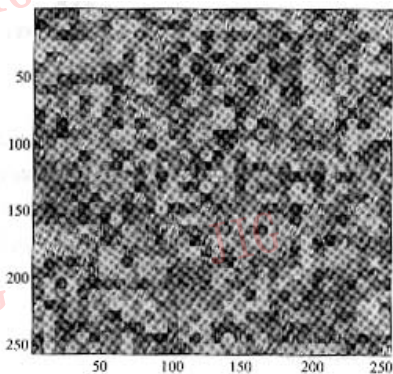
3 水印的嵌入和检测

通过以上分析,本文试图将这种思想应用到水印的嵌入算法中。水印嵌入算法如下:

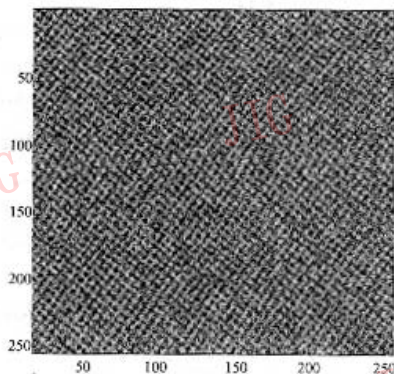
(1) 在对原始图像(记做 I)进行小波变换前,先按照一定的规则将原始图像置乱成置乱图像(或者类似于在图像的DCT变换中将图像先分成 8×8 的小块,然后再以这种小块为单位进行置乱,本文中称之为块置乱;或者直接将每个像素看作一个单位进行置乱,本文称之为像素置乱,本文中的试验结果和一些效果图都是基于像素置乱,图1表示对MatLab软件中的标准测试图像Woman的块置乱和像素置乱效果),记做 I_s (下角S代表置乱后);

(2) 将 I_s 进行3层小波分解,并按照一定规则抽取第3层上的小波系数来生成水印的载体序列 D ,其长度为 N ;

(3) 先以一个私有的密钥为种子生成满足高斯分布的随机水印信号 $W = (w_1, w_2, \dots, w_N)$,再按照一般的加法规则嵌入到小波系数中,得到嵌入水印信号的载体序列 D^w ,其中 $D_i^w = D_i + \alpha W_i, i = 1, 2,$



(a) 块置乱效果图



(b) 像素置乱效果图

图1 标准测试图像Woman的置乱效果

Fig.1 Scrambling the standard image 'Woman'

..., N , 而 α 仍然表示水印嵌入强度;

(4) 先将序列 D^w 按照获取 D 时的抽取规则放回小波变换的第 3 层中, 再通过小波反变换得到嵌入水印后的置乱图像 I_{sw} ;

(5) 按照第 1 步中的置乱规则, 将 I_{sw} 还原, 即得到最终载有水印信号的图像 I_w 。

在水印检测过程中, 不需要提供原始图像, 即水印的盲检测, 但是, 图像的置乱规则和从小波高频系数中抽取水印载体序列的规则以及产生水印序列的密钥却是水印嵌入者和检测者都必须预先知道的。

水印检测步骤如下:

首先, 将待检测图像 $\hat{I}$ 按照嵌入时的置乱规则置乱, 并做 3 层小波分解; 然后, 按照一定规则抽取第 3 层上小波系数来生成待检测序列 $\hat{D}$; 接着, 将待检测序列 $\hat{D}$ 与水印序列 W 做归一化线性相关处理, 即可得到二者的相关性系数

$$S = \frac{W^T \hat{D}}{\sqrt{W^T W} \sqrt{\hat{D}^T \hat{D}}}$$

最后, 利用给定阈值 t 进行判断:

$$\begin{cases} \text{如果 } S > t, & \text{则水印信号存在;} \\ \text{如果 } S \leq t, & \text{则水印信号不存在。} \end{cases}$$

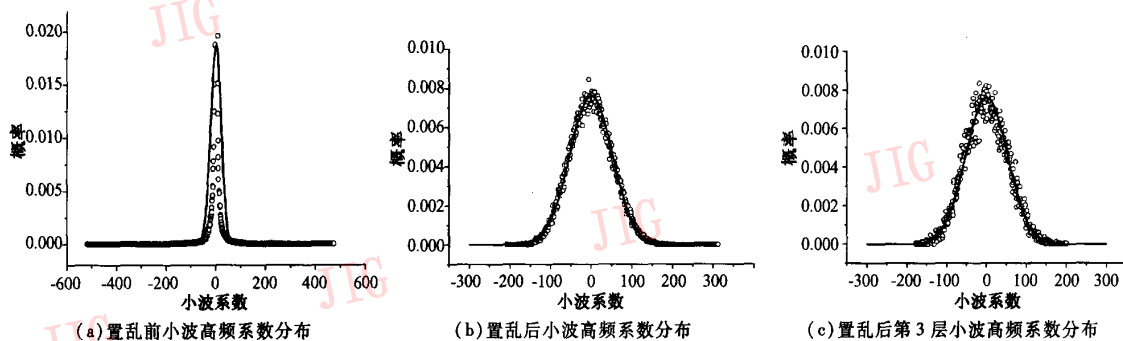


图 2 标准图像 Lena 的小波高频系数分布情况

Fig. 2 Distribution of high-frequency coefficients of the standard image 'Lena'

图 2(a) 表示 Lena 图像置乱前小波高频系数的统计分布情况(文献[5]结果), 图 2(b) 表示 Lena 图像置乱后所有频率段小波高频系数的统计分布情况, 图 2(c) 表示 Lena 图像置乱后第 3 层高频小波系数的统计分布情况。通过以上分析, 就可以认为前一节给出的水印系统中所使用的水印载体序列服从高斯分布(同时在 SPSS 软件中通过正态性检验), 同时可以利用密钥生成服从高斯分布的水印信号, 这样就可以使得线性相关检测在这个水印系统中是最优的。

4 置乱后图像小波高频系数的统计分布模型

在文献[5]中, Mallat 采用零均值的广义高斯分布来拟合小波高频系数的统计分布, 也就是说, 图像小波高频系数大多集中在零附近。众所周知, 由于小波高频系数代表图像的边缘和纹理, 而且当图像边缘和纹理比较丰富时, 小波高频系数值就会增大, 因此可以想象一幅噪声图像的小波高频系数统计分布应该非常近似于高斯分布。前边的水印嵌入算法, 是首先将原始图像置乱, 但这样做因破坏了原始图像的自然纹理而类似于一幅噪声图像(见图 1)。下面给出标准测试图像 Lena 经过置乱前后小波高频系数的统计分布情况, 为了表示方便, 这里记小波高频系数为 C 。

图 2 中的空心点状曲线表示小波系数的真实分布, 实线表示利用 $p(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}}$ 拟合的结果, 其中, $\mu = 0, \sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C_i^2$ 它们分别对应样本均值和样本方差。

为进一步说明问题, 本文在图 3 中给出两个标准图像 Boat 图像和 Woman 图像置乱后所有频率段小波高频系数的统计分布情况。由图 3 可以看出, 对于一般的自然图像, 置乱后图像的小波高频系数可以认为是服从高斯分布的。

5 实验结果

为了验证本文算法的有效性, 选取标准测试图像 Lena 作为水印信号的载体图像, 利用私有密钥生

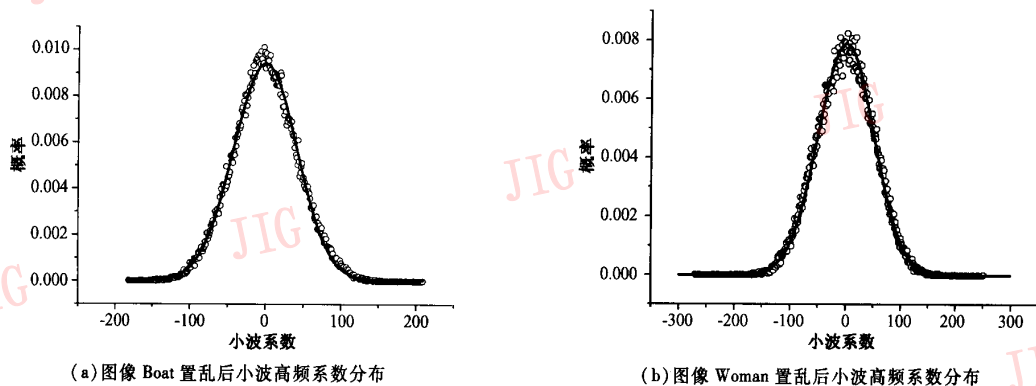
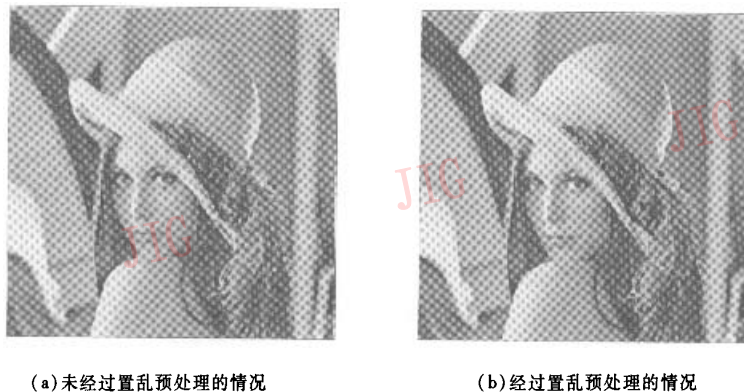


图3 两个标准测试图像置乱后小波高频系数分布

Fig. 3 Distribution of high-frequency coefficients of two standard images

成500个长度为10000且服从高斯分布的不同的随机序列 W_k ($k=1,2,\dots,500$),其中所有序列方差均为1,均值为0。实验是以第250个序列 W_{250} 作为水印信号嵌入到标准图像Lena的第3层高频小波系数中。之所以生成500个不同的随机序列,而只选择其中一个作为水印信号,目的是为了直观地比较线性相关检测器对于真正水印信号和非水印信号的输出结果。图4(a)和图4(b)分别表示在原始图像未置乱与置乱两种情况下嵌入同等水印信息 W_{250}

的结果。图4(a)的结果就带有明显的块效应,而图4(b)的结果则将图4(a)中的“块效应”散布到整个图像中,其类似于使图像感染了轻微的几乎不可见的随机噪声。由两图比较可见,图4(b)的视觉效果要优于图4(a)的视觉效果。图5表示本文给出的水印系统的线性相关检测器输出结果,其中横坐标表示输入的随机序列的序号,纵坐标表示线性相关检测器对每一个输入序列的响应。当设定适当的阈值后,就可以检测到水印信号 W_{250} 的存在。



(a) 未经过置乱预处理的情况

(b) 经过置乱预处理的情况

图4 经过置乱预处理和未经过置乱预处理两种情况下嵌入水印的Lena图像

Fig. 4 Embedding watermark into image 'Lena' that is scrambled or not

6 结论

由于基于小波域的盲数字水印系统在水印检测过程中不能提供原始图像,致使水印的鲁棒性难以保障,所以有时就需要牺牲一定程度的不可视性(增大水印的嵌入强度 α)来获取更高的鲁棒性。本文在保持嵌入强度 α 不变的前提下,通过

先对原始图像进行置乱预处理,而后再将水印嵌入到图像小波域中,以达到将水印所引入的“块效应”化整为零地分布到图像的不同部分的目的,这样就在一定程度上提高了水印视觉上的“不可感知性”。另外,在试验中还发现,经过置乱预处理后的图像,其小波变换后得到的小波高频系数服从高斯分布,这就使得线性相关检测在这个水印系统中能够达到最优。

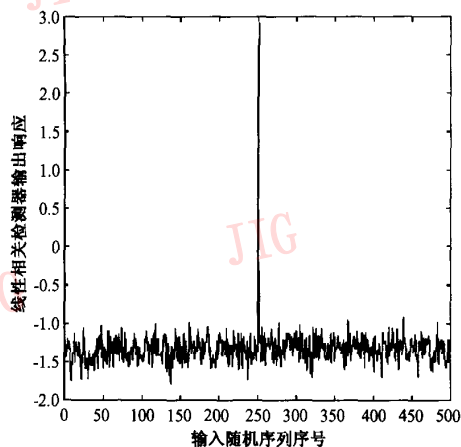


图 5 线性相关检测器输出响应

Fig. 5 Responses of linear-correlation detector

参考文献 (References)

- 1 Cox Ingemar J, Kilian Joe, Leighton Tom, *et al.* Secure spread spectrum watermarking for multimedia [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(12):1673 ~ 1687.
- 2 Malvar Henrique S, Florencio Dinei A F. Improved spread spectrum: A new modulation technique for robust watermarking [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2003, 51(4): 898 ~ 905.
- 3 Cox Ingemar J, Miller Matthew L. The first 50 years of electronic watermarking [J]. Journal of Applied Signal Processing, 2002, 2: 126 ~ 132.
- 4 Cox Ingemar J, Miller Matthew L, Bloom Jeffrey A. Digital Watermarking [M]. San Diego, CA, USA: Academic Press, 2002.
- 5 Mallat Stephane G. Multifrequency channel decomposition of image and wavelet models [J]. IEEE Transactions on Acoustic Speech and Signal Processing, 1989, 37(12): 2091 ~ 2110.
- 6 Wang Hounq J, Su Po, Jay Kuo C C. Wavelet-based digital image watermarking [J]. Optics Express, 1998, 3(12): 491 ~ 496.