

Balanced opt-rec 多小波域内信息分层 隐藏的分析与实现

唐笑年^{1,2}, **王树勋**², 王 丹^{1,2}

(1. 吉林大学物理学院, 吉林长春 130021; 2. 吉林大学通信工程学院, 吉林长春 130025)

摘 要: 对图像 BOR (Balanced Optimal-Reconstruction) 多小波分解后的系数进行了详尽地分析, 提出图像多小波变换的分层性 (不同于分解的级数) 观点. 针对这一特点, 待隐藏的信息可分层嵌入图像 BOR 多小波域, 这为隐藏算法又提供了一个密钥. 将可读的自适应盲水印信息分别嵌入图像 BOR 域第一层子图和同时嵌入四层层子图中. 仿真实验表明, 两种方案嵌入的水印图像拥有优良的不可感知性和强健的鲁棒性.

关键词: BOR 多小波; 分层性; 数字水印; 鲁棒性

中图分类号: TN911. 73 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2009) 06-1226-06

Analysis and Realization of Data Hiding in Different Layers of Balanced Opt-Rec Multiwavelet Domain

TANG Xiao-nian^{1,2}, **WANG Shu-xun**², WANG Dan^{1,2}

(1. College of Physics, Jilin University, Changchun, Jilin 130021, China;

2. Institute of Communication Engineer, Jilin University, Changchun, Jilin 130025, China)

Abstract: On base of detailed analysis of the decomposed coefficients of BOR multiwavelet, the "layer" concept of an image in MWD (multiwavelet domain) was proposed. For this unique character, data can be hidden in different layer subimages, the selection of hiding layer undoubtedly gives another secret key. An adaptive blind watermarking algorithm is put forward to embed a binary image into the first layer subimage and four layers respectively according to above trait. Experimental results show that the two given methods have good imperceptibility and high robustness.

Key words: BOR multiwavelet; layer character; digital watermarking; robustness

1 引言

信息隐藏的重要分支——数字水印技术的研究和发展, 已成为多年来国际学术界的一个前沿研究领域. 鉴于时空域水印算法嵌入信息量少、鲁棒性差等弱点, 近年来的水印文献大都集中在变换域, 而有着“数学显微镜”美誉的小波变换更以其优良的时、频局部特性在众多变换域中脱颖而出. 多小波是单小波的一个自然推广, 它同时拥有正交、对称、短支集和高消失矩等性质, 这对单小波来说是不可能的. 众所周知, 在图像处理的实际应用中, 分析工具同时拥有正交性 (保持能量) 和对称性 (线性相位) 这两种性质是十分重要的, 因此多小波分析成为多年来小波理论和应用中一个非常活跃的研究领域.

文献[1]指出: 从原则上讲, 图像处理中, 任何单小波能应用的领域, 多小波也同样适用. 目前在图像处理方面的应用, 多小波已在静止图像的压缩、编码、去噪和图像融合等方面取得了一定的成果, 特别是在去噪、压缩等方面, 显示出比单小波效果更好的优势; 同时, 离散单小波域内的图像水印算法可谓是百花齐放, 然而学者们对多小波域内信息隐藏算法的研究却少之甚少. Kumsawat^[2]和 Zhao^[3]将高斯伪随机序列按单小波域嵌入算法直接嵌入到 GHM 多小波域内, 算法简单; 张军^[4]和 Kumsawat^[5]分别利用神经网络和遗传算法将二值图像嵌入多小波域, 这些利用人工智能的自适应技术的普遍特点是算法本身的复杂性; 近期, 朱岩^[6]提出了一种图像多小波变换域内基于扩频和量化的混合数字水印方案, 理论分析和实验结果表明算法实现了水印鲁棒性

收稿日期: 2007-12-03; 修回日期: 2008-11-23

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 60572069)

前提下的水印容量最大化的目的, Ghouti^[7] 提出了平衡多小波域基于不同于传统的 JND 感知模型的大容量水印信息的嵌入算法; 后两者为多小波域的水印技术带来了生机, 但嵌入的都是随机序列. 缺乏对数字信号多小波变换特点的分析与认识使得多小波域的水印算法失去了生机和活力. 基于多小波变换本身结构特点的信息隐藏技术有待于进一步的研究.

本文从另一个角度分析了多小波分解系数的分层性特点, 提出待隐藏信息可分层嵌入的观点, 尤其在单层嵌入时, 在保证好的不可感知性和强健的鲁棒性前提下可减少计算量、提高计算速度, 其它三层子图的闲置也预示了多小波域内信息隐藏容量的潜在优势. 文章第二部分简单介绍了 BOR 多小波, 详细地分析了图像 BOR 分解的分层性特点; 第三部分, 随机选择嵌入子层, 尝试性地将水印信息仅嵌入 BOR 域第一层子图和四层子图同时植入; 第四部分给出实验结果及理论分析; 最后总结全文.

2 图像的 BOR 多小波变换及其系数分层特点的分析

2.1 BOR 多小波

BOR(Balanced Optimal-Reconstruction) 多小波^[8] 是王玲利用正交性和对称性构造的支集在 $[0, 1]$ 上具有精确重构特性和二阶逼近性的多小波, 它也恰是 Micchelli 和 Xu 构造的具有自防射映射特性的区间多小波的一个特例, 经一阶平衡后, 有好的低通和高通特性, 应用时无需预滤波. BOR 多小波在多小波中具有最短的支集长度, 在形成变换矩阵时, 没有支集重叠部分, 因而在小波分解后能精确重构, 无边界失真效应, 避免了边界延拓. 其作用类似于单小波中的 Haar 基, 但却有比 Haar 基更高的消失矩. 因此相应于 Haar 小波, 该多小波必然以其自身的优点(最短的支集、最快的计算速度、高的重构质量、较高的消失矩等) 跻身于图像信息隐藏中多小波基选择的前列.

2.2 图像的 BOR 多小波变换

以 BOR 多小波的低通分解与重构过程为例(高通过程同理), BOR 多小波所对应的低通矩阵滤波器长度 $l=2$, 形式如下:

$$H_0 = \begin{bmatrix} h_1(0) & h_1(1) \\ h_2(0) & h_2(1) \end{bmatrix}, H_1 = \begin{bmatrix} h_1(2) & h_1(3) \\ h_2(2) & h_2(3) \end{bmatrix}$$

它对一维离散信号 $f(n)$ 的低通分解过程(以一级分解为例) 等价于两个单小波 $h_1 = (h_1(0), h_1(1), h_1(2), h_1(3))$ 、 $h_2 = (h_2(0), h_2(1), h_2(2), h_2(3))$ 分别对该信号进行低通滤波分解. 对多小波滤波后的系数做二抽取等价于单小波分解系数的四抽取. 分解系数经四插后与相应的重构滤波器卷积相加即可得到重构信号 $f(n)$ (如图 1 示).

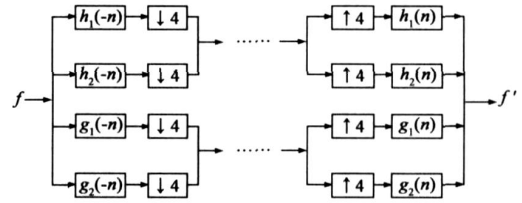
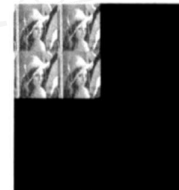


图1 与多小波等效的单小波分解重构图

推广至二维图像信号, 仍以一级变换的低通过程为例(高通同理), h_1, h_2 分别对图像 $(N \times N)$ 进行行、列滤波四抽取后的系数位于 $N \times N$ 系数矩阵左上四分之一处. 此过程相当于空域的四个二维 4×4 低通滤波器 $(L_1L_1, L_2L_1, L_1L_2, L_2L_2)$ 分别作用于原图像四抽取后的结果(如图 2 示, (1) 表示一级分解); 而相应于单小波的 Haar 基则为空域的一个二维 2×2 低通滤波器作用于原图像二抽取后的结果.



(a) lena 图像 BOR 基一级分解

$L_1L_1(1)$	$L_2L_1(1)$	$H_1L_1(1)$	$H_2L_1(1)$
$L_1L_2(1)$	$L_2L_2(1)$	$H_1L_2(1)$	$H_2L_2(1)$
$L_1H_1(1)$	$L_2H_1(1)$	$H_1H_1(1)$	$H_2H_1(1)$
$L_1H_2(1)$	$L_2H_2(1)$	$H_1H_2(1)$	$H_2H_2(1)$

(b) 深色区域为四个二维 4×4 低通滤波器滤波后四抽取的系数

图2

2.3 多小波变换的分层性

一维离散信号, 如 $(x_1 x_2 x_3 x_4 x_5 x_6 x_7 x_8)$, Haar 基对其分解的系数 $(d_1 d_2 d_3 d_4 g_1 g_2 g_3 g_4)$, 其中 $d_i (i=1 \sim 4)$ 为低频系数(近似分量), $g_i (i=1 \sim 4)$ 为高频系数(细节分量); BOR 基分解的系数 $(d_{11} d_{12} d_{21} d_{22} g_{11} g_{12} g_{21} g_{22})$, 其中 $d_{1i}, g_{1i} (i=1, 2)$ 为第一个小波分解的低、高频系数; $d_{2i}, g_{2i} (i=1, 2)$ 为第二个小波分解的低、高频系数.

第一个小波对应的低、高通滤波器 h_1, g_1 分解的一层信号 = 低频部分(将 $d_{11} d_{12}$ 四插后与 h_1 卷积) + 高频部分(将 $g_{11} g_{12}$ 四插后与 g_1 卷积);

第二个小波对应的低、高通滤波器 h_2, g_2 分解的一层信号 = 低频部分(将 $d_{21} d_{22}$ 四插后与 h_2 卷积) + 高频部分(将 $g_{21} g_{22}$ 四插后与 g_2 卷积).

最终的重构信号等于两层相加. 推广至二维图像, 多小波变换将图像分为四层子图(如图 3 示).

有了分层性的观点后, 参照图 4 再来看多小波、单小波域一级分解系数与空域图像像素值之间的关系: 由图 4 可知, 改变 Haar 域的一个系数, 等于修改了空域图

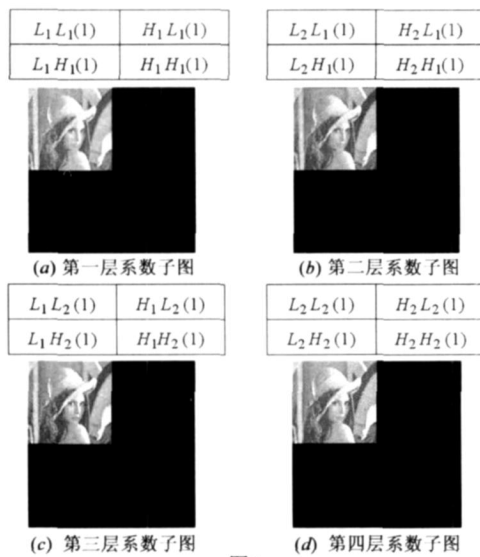


图3

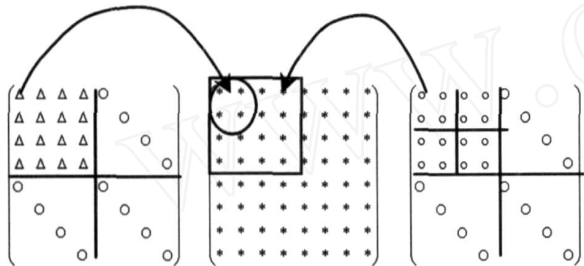


图4

像的四个像素值;而改变BOR域的一个系数,等于修改了空域图像的十六个像素值,可见,虽然单小波与多小波分解后的系数都呈现 $N \times N$ 的矩阵形式,但两者的意义是完全不同的,Haar域系数是顺次的关系,而BOR域系数是层与层的并列的关系。

3 BOR域水印的分层嵌入

对经典的小波域扩频水印算法稍做修改,选择 $512 \times 512 \times 8\text{bits}$ 的 lena 灰度图像 BOR 域二级分解的中高频(细节子带)系数作为水印的嵌入区域。经分析,小波(高频)系数 $f_{j,k}$ 可表示如下:

$$f_{j,k} = \frac{2^{-j/2}}{p!} 2^{-jpf^{(p)}} (2^{-jk}) \int_c^d t^p(t) dt \quad (1)$$

由于 $\int_c^d t^p(t) dt > 0$,故 $f_{j,k}$ 随 j 的增大而快速变小,其中, $p=2$ 为 BOR 的消失矩阶数, j 为函数在第 $(-j)$ 个闭子空间 V_{-j} 展开,即分解的级数。一级分解,即 $j=-1$ 最大,细节子带系数最小,集中在零均值附近,因此在小波域的数字图像处理中一般不选择一级分解,通常选用二级以上的分解;二级分解的中高频系数要大一些,但也集中在零均值附近且呈近似的高斯分布。当图像分为 $n \times n$ 的小子块后,处于纹理和边缘附

近的子块具有更大的方差值,这样利用各块中的均值和方差值作为水印信息的一部分,自适应地调节水印嵌入的强度,在满足水印不可感知的前提下最大强度地嵌入水印信息。

3.1 只在单层子图中嵌入水印(方案1)

对 lena 图像 BOR 域二级分解系数的统计如表 1。

表1 BOR域 lena 图像的二级分解系数能量比例分配

	一层子图	二层子图	三层子图	四层子图
占总能量比例 (%)	24.96	25.12	24.90	25.02

由于各层子图能量均衡,可任选一层嵌入,为方便水印就在第一层子图(图 5(b)中的深色区域)中嵌入。



$L_1L_1(2)$	$L_2L_1(2)$	$H_1L_1(2)$	$H_2L_1(2)$	$H_1L_1(1)$	$H_2L_1(1)$
$L_1L_2(2)$	$L_2L_2(2)$	$H_1L_2(2)$	$H_2L_2(2)$	$H_1L_2(1)$	$H_2L_2(1)$
$L_1H_1(2)$	$L_2H_1(2)$	$H_1H_1(2)$	$H_2H_1(2)$	$H_1H_1(1)$	$H_2H_1(1)$
$L_1H_2(2)$	$L_2H_2(2)$	$H_1H_2(2)$	$H_2H_2(2)$	$H_1H_2(1)$	$H_2H_2(1)$
$L_1H_1(1)$	$L_2H_1(1)$	$H_1H_1(1)$	$H_2H_1(1)$		
$L_1H_2(1)$	$L_2H_2(1)$	$H_1H_2(1)$	$H_2H_2(1)$		

(b)

图5 BOR域lena图像的二级分解示意图((1)表示一级分解,(2)表示二级分解)深色区域为二级分解的第一层子图系数

3.1.1 水印的嵌入

- (1) 将 $512 \times 512 \times 8\text{bits}$ 灰度图像分成 4096 个 8×8 子块,每一子块做二级 BOR 多小波变换。
- (2) 将待嵌入的二值水印图像利用行扫描将其映射为一维向量 watermark,利用伪随机数发生器随意选取任意不重合的 k 个子块,其中 k 的大小等于一维向量 watermark 的长度。

- (3) 根据一维向量 watermark 的值来修改 BOR 域二级分解的第一层子图的中高频系数,若第 j 个子块对应水印位为 $\text{watermark}(j) = 0$,则修改该块内第一层子图的 15 个中高频系数为

$$\tilde{g}_j(i) = g_j(i) - \text{average}_j + T_j, (1 \leq i \leq 15, 1 \leq j \leq k) \quad (2)$$

若第 j 个子块对应水印位为 $\text{watermark}(j) = 1$,则

$$\tilde{g}_j(i) = g_j(i) - \text{average}_j, (1 \leq i \leq 15, 1 \leq j \leq k) \quad (3)$$

$\tilde{g}_j(i)$ 为第 j 个子块中受水印信号调制后的中高频系数, average_j 为该子块中二级分解的一层子图中 15 个中高频系数的均值。水印嵌入强度

$$T_j = 4 + \left\{ \begin{matrix} 2 \\ \frac{1}{15} \end{matrix} \right\} \quad (4)$$

其中 σ_j^2 为常数, σ_j^2 为子块中 15 个中高频系数的方差.

这种算法的实质是利用图像不同区域的均值和方差来自适应地调整水印嵌入的强度,而我们只把这种调制限制在 BOR 域的第一层子图中.

3.1.2 水印的提取

将受到攻击的水印图像分成 8×8 的子块,利用在嵌入过程中同样的“种子”得到嵌入水印的子块,每一子块做二级 BOR 多小波变换,提取第一层子图的两级中高频系数计算其总和 s ,嵌入“1”的子块系数的总和 s 近似为零,而嵌入“0”的子块 $s = 15 T_j$,把 s 与一个预先指定好的固定阈值 Th 相比较,若 $s < Th$,则 watermark(j) 译为“1”,否则, watermark(j) 译为“0”.当恢复出水印序列信息后,再按照水印构造的逆过程,得到一幅二值图像.

选择 BOR 域单层嵌入的优势是多小波分解时无需预滤波且只需修改 15 个系数值,计算量小,计算速度快,子图层数的选择为水印的安全性又提供了一个密钥.

3.1.3 确定嵌入强度 T_j 的理论分析(平衡不可感知性和嵌入强度)

以一维离散信号的一级分解为例:设采样信号为 8 个离散值,经 Haar 基和 BOR 基一级分解后,

$$\text{Haar 小波的高通重构滤波器系数: } g = \left[\frac{1}{\sqrt{2}}, -\frac{1}{\sqrt{2}} \right],$$

BOR 的高通重构矩阵滤波器系数:

$$G_1 = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{3}-3}{4\sqrt{2}} & \frac{1-\sqrt{3}}{4\sqrt{2}} \\ \frac{1+\sqrt{3}}{4\sqrt{2}} & \frac{-\sqrt{3}-3}{4\sqrt{2}} \end{bmatrix}, G_2 = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{3}+3}{4\sqrt{2}} & \frac{-1-\sqrt{3}}{4\sqrt{2}} \\ \frac{\sqrt{3}-1}{4\sqrt{2}} & \frac{-\sqrt{3}+3}{4\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

第一个小波的高通重构滤波器系数:

$$g = \left[\frac{\sqrt{3}-3}{4\sqrt{2}}, \frac{1-\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, \frac{3+\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, \frac{-1-\sqrt{3}}{4\sqrt{2}} \right]$$

设 Haar 域的 4 个高频系数的嵌入强度即每个系数改变量 $P=1$,同理,BOR 域的第一层 2 个系数(因只在一层中嵌入)的嵌入强度即每个系数的改变量也为 $P=1$.不可感知性的度量

$$PSNR = 10 \log \frac{255^2}{\sqrt{\frac{1}{M \cdot N} \sum (F_i - F_{wi})^2}} \quad (5)$$

其中, $F_i = F_i - F_{wi}$, F_i 为原始图像第 i 个像素值与改变后的像素值之差.对多(单)小波域来说,即为每个高频系数的改变量(嵌入强度 P) 序列四插(二插)与高频重构滤波器卷积后平方加和.所以,Haar 域(每个高频系数的改变量 $P=1$):

$$h = 8 \times \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \right)^2 = 4$$

BOR 域一层(每个高频系数的改变量 $P=1$,与 Haar 域嵌入强度相同):

$$b_1 = 2 \times \left[\left(\frac{\sqrt{3}-3}{4\sqrt{2}} \right)^2 + \left(\frac{1-\sqrt{3}}{4\sqrt{2}} \right)^2 + \left(\frac{3+\sqrt{3}}{4\sqrt{2}} \right)^2 + \left(\frac{-1-\sqrt{3}}{4\sqrt{2}} \right)^2 \right] = 2$$

BOR 域一层(每个高频系数的改变量 $P=4$,嵌入强度增加到 4 倍):

$$b_4 = 2 \times \left[\left(4 \times \frac{\sqrt{3}-3}{4\sqrt{2}} \right)^2 + \left(4 \times \frac{1-\sqrt{3}}{4\sqrt{2}} \right)^2 + \left(4 \times \frac{3+\sqrt{3}}{4\sqrt{2}} \right)^2 + \left(4 \times \frac{-1-\sqrt{3}}{4\sqrt{2}} \right)^2 \right] = 32$$

由 $b_1 < b_h < b_4$ 知,BOR 域单层嵌入水印(15 个高频系数每个改变量 $P=1$) 时的重构质量最好,但鲁棒性差;而嵌入水印强度增至 4 倍(15 个高频系数每个改变量 $P=4$) 时的重构质量最差,经试验鲁棒性明显提高;所以为折衷水印图像的不可感知性和鲁棒性,最终

嵌入的强度为 $T_j = 4 + \left(\frac{2}{15} \right)$.

3.2 在四层子图中同时嵌入水印(方案 2)

若上述算法能在单层子图中实现,即根据待嵌入的“0”、“1”水印位仅修改单层子图的中高频系数;那么我们可以选择任意两层、三层甚至四层子图同时嵌入,即根据待嵌入的水印位修改任意两层、三层甚至四层子图的中高频系数.这里选择了另一种极端情况,即在 BOR 域的四层子图中同时嵌入水印信息.嵌入和提取水印的方法同上,区别只是根据一维向量 watermark 的值来修改 BOR 域四层子图的 60 个中高频系数. $T_j = 4 + \left(\frac{2}{60} \right)$,其中 σ_j^2 为常数, σ_j^2 为子块中 60 个中高频系数的方差.

4 实验结果及分析

为与文献[9]中方法比较,以上两种嵌入方案的待嵌入水印均为 20×40 的“JLU”二值图像.以下表与图中,“Haar”表示文献[9]中的方法,“BOR1”表示本文方案 1,即仅在第一层嵌入水印,“BOR”表示方案 2;“BER”为提取水印信息的错误比特率.

(1) 不可感知性的比较(如表 2 所示)

算法主要是修改了零水印位对应子块的中高频系数值.

方案 1 中嵌入的强度为 $T_j = 4 + \left(\frac{2}{15} \right)$, 实验中, $\beta = 3$, $\sigma = 0.318$, $Th = 80$.

方案 2 中嵌入的强度为 $T_j = 4 + \left(\frac{2}{60} \right)$, $\beta = 3$, $\sigma =$

0.318、 $Th = 175$, 即与 Haar 域中嵌入的强度相同, 与 Haar 域中该算法水印图像的不可感知性也是相同的(证明略)。但实验表明, BOR 多小波域该算法的水印图像的 PSNR 值要好于 Haar 域。经分析, 是由于各子块 BOR 分解后中高频系数的均值和方差都略小于 Haar 分解后中高频系数的方差, 即 BOR 域的嵌入强度略小于 Haar 域嵌入强度, 但实验证明总体上却获得了更好的鲁棒性, 这也说明了多小波域内信息隐藏的潜力之所在。

表2 三种方法水印图像 PSNR 值的比较

	Lena	Plane	Boat	Elaine	Baboon
Haar	41.817	40.151	40.915	41.881	39.931
BOR1	42.456	42.400	42.008	42.568	40.572
BOR	43.29	43.156	42.436	43.586	40.843

(2) Lena 水印图像抗 JPEG 压缩的比较(图 6(a) 示)

方案 2 明显好于方案 1 和文献[9]中的方法, 这正是因为 BOR 多小波拥有比 Haar 小波高的消失矩所致, 高的消失矩意味着分解后接近零元的小波系数越多, 能量集中性越好, 因此抗压缩性越好; 而方案 1 的抗压缩性差于 Haar 域方法可能是因破坏了多小波的整体性所致。

(3) 抗剪切攻击的比较(如表 3 所示)

剪切实验中, 分别将水印图像剪切掉 1/4(中间、左上、左下、右上、右下)和 2/4(左半、右半、上半、下半)时, 三种嵌入方法所提取的误码率居然完全相同, 见下表; 而在大面积剪切时, 即剪切掉图像中间的 3/4 部分时, 提取的误码率才有了轻微的差别(Haar 域误码率为 15%, BOR 域 13.75%, BOR1 域为 13.13%)。至今还没有

分析出具体的原因。该算法的确具有很强的抗剪切性能, 在剪掉图像中间重要部分的 3/4 时, 水印图像仍可辨认。

表3 剪切攻击实验结果

	剪切 1/4 (中间)	剪切 1/4 (左上)	剪切 1/4 (右上)	剪切 1/4 (左下)	剪切 1/4 (右下)
BER (%)	4.62	4.25	4.62	4.88	4.50
	剪切 2/4 (左半)	剪切 2/4 (右半)	剪切 2/4 (上半)	剪切 2/4 (下半)	剪切 3/4 (中间)
BER (%)	9.12	9.12	8.87	9.38	

(4) 抗图像处理攻击的比较

在抵抗图像处理的攻击中, 文中的两种方案, 尤其是方案 1 呈现出明显的优势。

抗直方图均衡化的比较(图 6(b))

抗对比度调整的比较(图 6(c))

抗高斯低通滤波的比较(图 6(d))

(5) 抗高斯白噪声和椒盐噪声攻击的比较(图 6

(e), (f)) 抗随机噪声的攻击中, 方案 1 与文献[9]中方法的性能相当, 而方案 2 抵抗噪声攻击的能力略差一些。原因是随机噪声攻击即随机改变了水印图像像素值, 如前述 BOR 域中 1 个系数对应 16 个图像像素值, 而 Haar 域中 1 个系数对应 4 个图像像素值, 显然随机改变水印图像像素值对 BOR 域中系数的影响要大得多, 相应重构图像的误差大、误码率高。

综上看出, 文中提出的两种方案在总体上都呈现出好的不可感知性和鲁棒性。

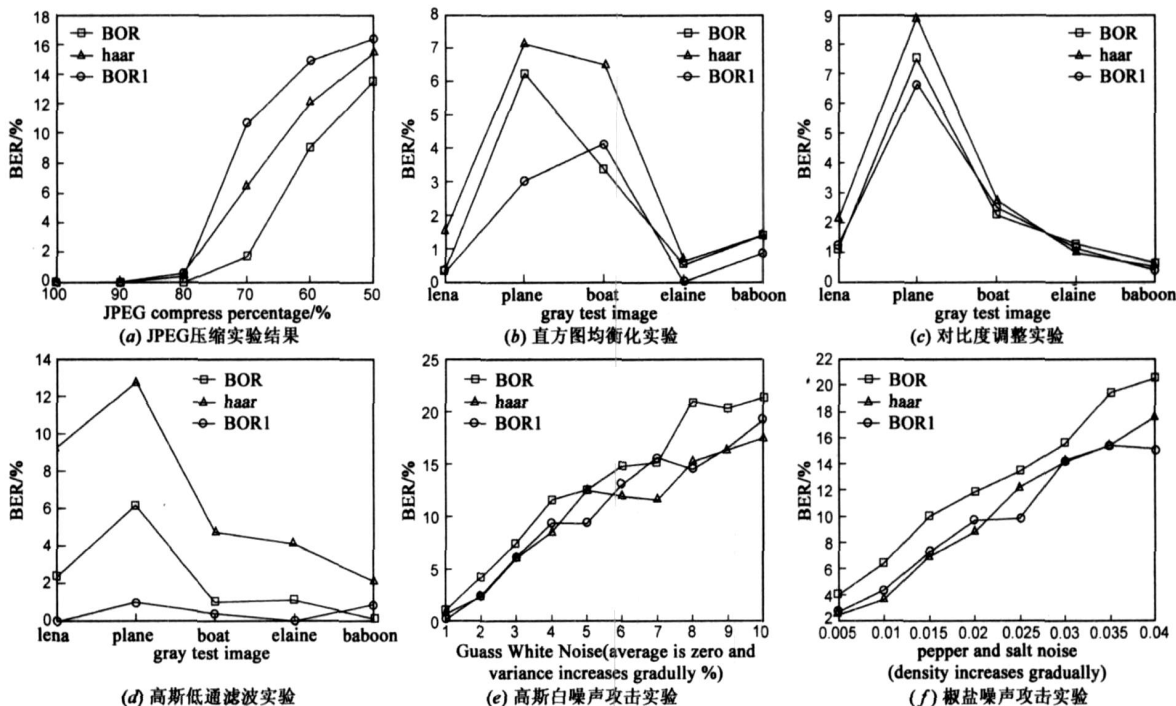


图6

5 结论

本文在详细分析 BOR 域系数分布规律的基础上首次提出图像多小波分解的分层性观点,成功地实现了信息分层隐藏的想法.只在其中一层隐藏水印信息而其它三层闲置,水印图像仍然拥有强健的鲁棒性,这也预示了多小波域内信息隐藏容量的潜在优势;而在四层中同时嵌入时,水印图像也显示了 BOR 基优良的重构质量和强健的抗压缩性.另外,利用多小波域独有的子图层与层之间的并列关系这一特点开辟新的水印算法也成为本文下一步的工作重点.

参考文献:

- [1] 高西奇,甘露,邹采荣.多小波变换的理论及其在图像处理中的应用[J].通信学报,1999,20(11):55-60.
Gao Xiqi, et al. Multiwavelet: Theory and its application in image processing[J]. Journal of Communications, 1999, 20(11): 55 - 60. (in Chinese)
- [2] Kumsawat P, Attakitmongcol K, Srikaew. The effects of transformation methods in image watermarking [A]. Analog and Digital Techniques in Electrical Engineering [C]. Chiang Mai, Thailand: IEEE press, 2004. 295 - 298.
- [3] Zhao J, Liu Z, Laganiere R. Digital watermarking by using a feature-based multiwavelet fusion approach [A]. Electrical and Computer Engineering [C]. Canadian: The Oxford Press, 2004. 563 - 566.
- [4] Zhang J, Wang N C, Feng X. A novel watermarking for images using neural networks [A]. IEEE Proceedings of the First International Conference on Machine Learning and Cybernetics [C]. Beijing: IEEE Press, 2002. 1405 - 1408.
- [5] Kumsawat P, Attakitmongcol K, Srikaew. A new approach for optimization in image watermarking by using genetic algorithms [J]. IEEE Trans Signal Process, 2005, 53(12): 4707 - 4719.
- [6] 朱岩,杨永田,冯登国.多小波变换域内基于扩频和量化的混合水印研究[J].电子学报,2006,34(10):1817-1822.
Research on hybrid watermarking baed on spread spectrum and quantization in multiwavelet domain [J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(10): 1817 - 1822. (in Chinese)
- [7] Ghouti L, Bouridane A, Ibrahim M K. Digital image watermarking using balanced multiwavelets [J]. IEEE Trans. Signal Process, 2006, 54(4): 1519 - 1536.
- [8] 王玲.多小波变换理论及其在图像处理中的应用研究[D].陕西西安:西安电子科技大学,2000.
Wang Ling. Theory of Multiwavelet Transformation and Its Application Research in Image Processing [D]. Xi 'an, Shaanxi: Xian University of Electronic Science and Technology, 2000. (in Chinese)
- [9] 张冠男.小波域自适应盲水印算法和半色调图像水印算法的研究[D].吉林长春:吉林大学,2005.
Zhang Guannan. The Researches on Adaptive Blind Watermarking Algorithm in DWT Domain and Halftone Images Watermarking Algorithm [D]. Changchun, Jilin: Jilin University, 2005. (in Chinese)

作者简介:



唐笑年 女,1976年1月出生于吉林省通化市,2004年获吉林大学理学硕士研究生学位,在读博士研究生,讲师.主要研究方向为信息安全、数字水印、数字图像处理等.
E-mail: tang. x. n @sina. com

王树勋 男,1946.3~2007.12.1970年毕业于清华大学电机系,1982年在吉林工业大学电子工程系获工学硕士学位.吉林大学教授、博士生导师.主要研究方向为高阶统计量在数字信号处理中的应用及微计算机应用.出版著作3部,发表论文200余篇.