

# 基于多尺度分解与预测误差扩展的可逆图像水印算法

张正伟<sup>1,2</sup> 吴礼发<sup>2</sup> 严云洋<sup>1</sup>

(淮阴工学院计算机与软件工程学院 淮安 223003)<sup>1</sup> (解放军理工大学指挥信息系统学院 南京 210007)<sup>2</sup>

**摘要** 针对现有可逆图像水印算法中嵌入量与图像视觉质量之间的矛盾,提出了一种基于多尺度分解与预测误差扩展的可逆图像水印算法。首先,对原始图像进行多尺度分解,将其分解为同质块和非同质块;其次,通过对同质块进行预测误差扩展来嵌入水印信息;最后,通过计算非同质块信息熵,根据嵌入水印信息量选择合适的非同质块,通过对选取的非同质块进行整数小波变换,在中高频中嵌入剩余水印信息。实验结果表明,该算法易于实现且完全可逆,能有效提高水印嵌入量,具有较高的视觉质量。

**关键词** 可逆图像水印,预测误差扩展,整数小波变换,多尺度分解,视觉质量

**中图分类号** TP309 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2017.12.020

## Reversible Image Watermarking Algorithm Based on Multi-scale Decomposition and Prediction Error Expansion

ZHANG Zheng-wei<sup>1,2</sup> WU Li-fa<sup>2</sup> YAN Yun-yang<sup>1</sup>

(Faculty of Computer and Software Engineering, Huaiyin Institute of Technology, Huai'an 223003, China)<sup>1</sup>

(College of Command Information System, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)<sup>2</sup>

**Abstract** In view of the contradiction between the embedding capacity and the visual quality of the existing reversible image watermarking algorithm, a reversible image watermarking algorithm based on multi-scale decomposition and prediction error expansion was proposed. Firstly, the original image is decomposed into homogeneous and non-homogeneous blocks by multi-scale decomposition. Then, the watermark information is embedded by the prediction error expansion of homogeneous blocks. Finally, based on the calculation of non-homogeneous block information entropy, the non-homogeneous blocks are selected according to the amount of embedded watermark information, and the remaining watermark information is embedded in the middle and high frequency by integer wavelet transform. Experimental results show that the proposed algorithm is easy to implement and is completely reversible, and it can effectively improve the watermark embedding capacity and has higher visual quality.

**Keywords** Reversible image watermarking, Prediction error expansion, Integer wavelet transform (IWT), Multi-scale decomposition, Visual quality

## 1 引言

与传统数字图像水印<sup>[1]</sup>相比,可逆图像水印在水印嵌入方面提出了更高的要求,从而在司法、军事、医疗等对图像真实性和完整性要求较高的领域具有更加广泛的研究价值和实用价值。

Tian<sup>[2]</sup>提出的基于相邻像素对差值扩展的大容量可逆水印算法已经受到了越来越多的关注。由于其具有较大的嵌入容量和较高的视觉质量,且算法复杂度低而便于实现,因此国内外学者提出了很多基于差值扩展的改进嵌入算法。

为了提高算法的嵌入容量并降低失真率等,郑淑丽等人<sup>[3]</sup>提出了一种基于图像位平面图分解理论的差值扩展算法。该算法只针对图像较低层的位平面图进行信息嵌入,而不改变图像其他较高位平面的像素值,通过这样的操作,在减小图像失真的同时,提高了总的信息隐藏量。

文献[4]中将差值扩展与LSB算法相结合的可逆图像水印算法取得了较大的嵌入容量,且视觉质量较好。嵌入水印信息或多或少都会造成原图像失真,为了进一步减小图像失真,Li等人<sup>[5]</sup>提出了一种基于像素排序和预测误差扩展的可逆信息隐藏算法。该算法改善了隐密图像的质量,但其嵌入容量较低,且图像分块越大,容量越低。Lin等人<sup>[6]</sup>提出了将直方图平移和预测差值相结合的算法来扩大可逆水印的嵌入容量,达到了较好的效果。

张正伟等人<sup>[7]</sup>提出了一种基于整数小波变换(IWT)和广义差值扩展的可逆水印算法。该算法将原始图像划分成 $4 \times 4$ 大小的互不重叠的像素块;计算各分块的近似平滑度值,该值在水印嵌入前后保持不变;将所有分块按平滑度值进行排序,根据水印信息量,依序选取适当数目的分块;对所选取的分块进行整数小波变换,在变换后的低频部分利用广义差值扩展法嵌入水印信息,在高频部分通过数据压缩嵌入水印辅

到稿日期:2016-12-01 返修日期:2017-03-24 本文受国家自然科学基金项目(61402192),江苏省自然科学基金(BK20131069)资助。

张正伟(1981-),男,博士,讲师,主要研究方向为信息隐藏、图像处理,E-mail: zzw49010650@sina.com;吴礼发(1968-),男,博士,教授,主要研究方向为信息安全、网络安全;严云洋(1967-),男,博士,教授,主要研究方向为信息安全、图像处理。

助信息。该算法在减小图像失真的同时,提高了信息的嵌入量。

由于图像纹理的复杂度不同,可将其分解为同质块和非同质块。在同质块区域中嵌入信息造成原始图像失真较小,相应地可以嵌入更多的信息;在非同质块区域中,利用合适的嵌入方法嵌入水印信息也可以有效地增加嵌入容量和提高视觉质量。鉴于此,本文提出了一种基于多尺度分解与预测误差扩展的可逆图像水印算法,该算法可以有效地增加图像水印嵌入容量并提高视觉质量。

## 2 知识背景

### 2.1 多尺度分解<sup>[8]</sup>

对一幅图像  $F$  从整体到局部进行多尺度划分,从而得到不同尺度的图像子块  $F_{i,j}$ ,其中  $i=1,2,\dots,d$  表示分割尺度,  $j=1,\dots,4^{i-1}$  表示每种尺度下的子块个数。分割方法如图 1 所示。整体图像为经过第 1 尺度分解后得到的子块  $F_{1,1}$ ,首先将整体图像分成 4 个子块  $F_{2,1}, F_{2,2}, F_{2,3}, F_{2,4}$ ,每个子块被称为第 2 尺度的子块,然后再对第 2 尺度的子块进行划分,直到达到设定的最大尺度为止。



图 1 Lena 图像的多尺度分割

由于传统的多尺度分解属于固定尺寸分块方法,为了更好地提高水印嵌入性能,本文对多尺度分解进行了改进。

改进的图像多尺度分解是将一个方形图像划分为 4 个等尺寸的方形块,然后判别这 4 个方形块是否满足同质性准则。若当前块满足,则保持不变,否则继续将其分解为 4 个方形块,并判定是否满足准则,直到所有的方块满足给定的准则为止。其分解准则为:

$$|P_i - P_{ave}| > (g_l - 1) \times \gamma \quad (1)$$

其中,  $P_i$  和  $P_{ave}$  分别代表方形块中的任一像素的灰度值和平均像素灰度值,  $g_l$  代表像素的灰度级数,  $\gamma$  为一个值为  $[0,1]$  的小数。该准则为:当方形块中的任一像素的灰度值与平均像素灰度值差的绝对值大于  $(g_l - 1) \times \gamma$  时,方块需要继续划分,如图 2 所示。

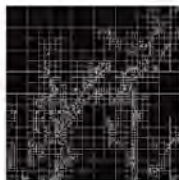


图 2 经改进的多尺度分解后生成的分块图

从分块方法来看,其属于不定尺寸的图像划分;从划分的结果来看,其分解得到的图像块中的像素具有高同质性,适合进行无损水印嵌入。本文算法中规定的最小块尺寸为  $4 \times 4$ 。

通过多尺度分解后的每个图像块的大小为  $2^{(2+n)} \times 2^{(2+n)}$ ,  $n \in \{0,1,2,\dots,7\}$ ,可将每块的尺寸信息转化为二进制

形式。对分解得到的各子块按分块尺寸大小进行编码,如表 1 所列。

表 1 多尺度分解后图像块的尺度编码

| 尺寸/像素 | 编码  | 尺寸/像素   | 编码  |
|-------|-----|---------|-----|
| 4×4   | 000 | 64×64   | 100 |
| 8×8   | 001 | 128×128 | 101 |
| 16×16 | 010 | 256×256 | 110 |
| 32×32 | 011 | 512×512 | 111 |

对通过多尺度分解后得到的图像子块进行排序(从上到下,从左到右),并按排序结果依次记录每一块的尺度信息,从而构成原始图像的分解信息  $q$ 。鉴于分解得到的尺寸较大的块数较少,可以使用 Huffman 编码<sup>[9]</sup>来进一步缩短图像分解信息的长度,将其表示为  $Huf(q)$ 。

为了保证算法的安全性,将参数  $Huf(q)$  的长度和编码表以密钥方式发送给接收方。

### 2.2 同质块误差预测

假设原始图像经多尺度分解后得到的同质块大小为  $m \times m$ ,对其各像素点进行预测以得到每个像素点的预测值。将各个像素点的像素值与其对应的预测值组成像素对,并通过差值扩展算法来嵌入水印。像素点值的预测估计主要分为 3 个部分。

(1) 首先预测 4 个顶点

为左上顶点时,其预测值为:

$$f'(0,0) = \left\lfloor \frac{f(1,0) + f(0,1)}{2} \right\rfloor$$

为右上顶点时,其预测值为:

$$f'(0,m-1) = \left\lfloor \frac{f(0,m-2) + f(1,m-1)}{2} \right\rfloor$$

为左下顶点时,其预测值为:

$$f'(m-1,0) = \left\lfloor \frac{f(m-2,0) + f(m-1,1)}{2} \right\rfloor$$

为右下顶点时,其预测值为:

$$f'(m-1,m-1) = \left\lfloor \frac{f(m-2,m-1) + f(m-1,m-2)}{2} \right\rfloor$$

(2) 预测除 4 个顶点外的边界像素点

为左边界点时,其预测值为:

For  $i=1; i++; i < m-1$

$$f'(i,0) = \left\lfloor \frac{f(i-1,0) + f(i,1) + f(i+1,0)}{3} \right\rfloor$$

为上边界点时,其预测值为:

For  $j=1; j++; j < m-1$

$$f'(0,j) = \left\lfloor \frac{f(0,j-1) + f(1,j) + f(0,j+1)}{3} \right\rfloor$$

为右边界点时,其预测值为:

For  $i=1; i++; i < m-1$

$$f'(i,m-1) =$$

$$\left\lfloor \frac{f(i-1,m-1) + f(i,m-2) + f(i+1,m-1)}{3} \right\rfloor$$

为下边界点时,其预测值为:

For  $j=1; j++; j < m-1$

$$f'(m-1,j) =$$

$$\left\lfloor \frac{f(m-1,j-1) + f(m-2,j) + f(m-1,j+1)}{3} \right\rfloor$$

(3)预测内部像素点

$$f'(i,j) = \left\lfloor \frac{f(i-1,j) + f(i,j-1) + f(i+1,j) + f(i,j+1)}{4} \right\rfloor$$

其中,  $f(i,j)$ 表示在图像  $(i,j)$  处的像素值,  $f'(i,j)$ 表示在图像  $(i,j)$  处的像素预测值。

### 3 算法设计

本文算法主要通过预测误差扩展水印算法来实现水印的嵌入与提取,主要包括水印嵌入和水印提取两个模块。

#### 3.1 水印嵌入

所提算法的图像水印嵌入流程如图3所示。

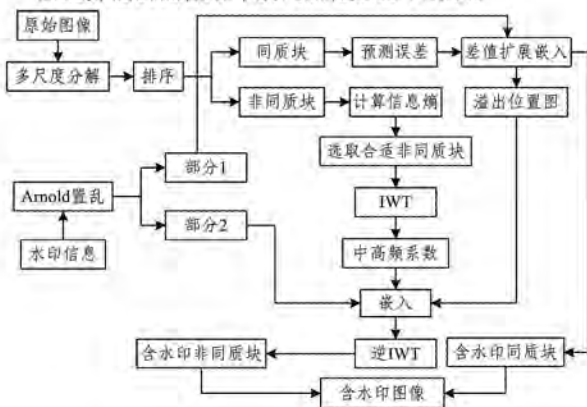


图3 水印嵌入流程图

具体嵌入步骤如下:

Step1 将水印图像  $W$  做 Arnold 置乱变换从而得到置乱后的图像  $W'$ , 将置乱后的图像  $W'$  转化为一维向量, 将变换次数  $K$  作为水印恢复密钥。

Step2 对原始图像  $I$  进行多尺度分解, 将分解后产生的分解信息(参数  $Huf(q)$  的长度和编码表)以密钥方式发送给接收方。

Step3 对分解后得到的每一子块  $I_p (0 \leq p \leq n, n$  为原始图像经分解后得到的子块总数), 按照从上到下、从左到右的顺序进行排序。

Step4 对于排序后所选取的所有同质块, 采用 2.2 节中的算法计算块中每个像素的预测值。将每个像素点的像素值和对应的预测值组成像素对, 并通过差值扩展算法来嵌入水印。

Step5 构建溢出图, 在溢出图中对利用差值扩展嵌入信息后会超出图像灰度值范围的像素点进行标注; 将压缩溢出图和剩余水印信息一起嵌入到非同质块中。

Step6 对于排序后所选取的所有非同质块, 通过式(2)计算每块的信息熵<sup>[10]</sup>, 将其值按照从小到大的顺序进行排序, 根据压缩溢出图和剩余水印信息量选取熵值较大的非同质块(假设后  $T$  块)进行嵌入, 直到所有水印嵌入完成。

$$S = - \sum_{i=0}^{255} \sum_{j=0}^{255} P(i,j) \lg P(i,j) \quad (2)$$

Step7 对选取的合适非同质块进行 IWT, 并在其中的高频系数  $HH, HL, LH$  中嵌入在同质块中未嵌入完的水印信息和压缩溢出图。嵌入公式如下:

$$C' = \begin{cases} C+1, & ((\text{if } \text{mod}(C,2)=1) \text{ and } (W'=1)) \text{ or} \\ & ((\text{if } \text{mod}(C,2)=0) \text{ and } (W'=0)) \\ C, & \text{else} \end{cases}$$

其中,  $W'$  为在同质块中未嵌入完的水印信息和压缩溢出图;  $C$  和  $C'$  分别表示非同质块经 IWT 后得到的中高频系数值和转换后得到的新的中高频系数值。

Step8 对嵌入水印后的非同质块进行逆整数小波变换, 从而得到嵌入水印之后的非同质块。按照多尺度分解块排序顺序将新生成的非同质块和通过预测误差扩展嵌入水印后生成的同质块结合在一起, 从而构成最终的含水印图像  $I'$ 。

#### 3.2 水印提取

水印提取为水印嵌入的逆过程, 其流程如图4所示。

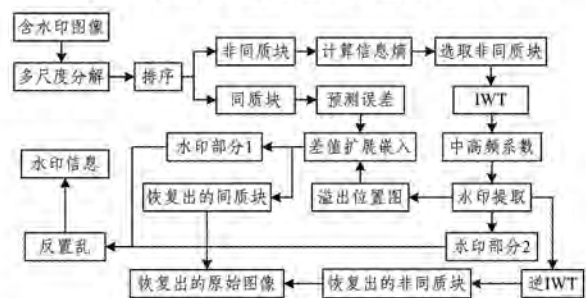


图4 水印提取与图像恢复流程图

具体操作流程如下:

Step1 接收方通过密钥方式从发送方接收到原图像的多尺度分解信息, 以此来对含水印图像进行多尺度分解。

Step2 对分解后的各子块  $I_p (0 \leq p \leq n, n$  为待检图像经分解后得到的子块总数) 按照从上到下、从左到右的顺序进行排序。

Step3 计算排序后所选取的所有非同质块的信息熵, 并将其值按照从小到大的顺序进行排序, 选择后  $T$  块非同质块来进行水印提取。

Step4 对选取的合适非同质块进行 IWT, 并在其中的高频系数  $HH, HL, LH$  中通过式(3)来提取嵌入在非同质块中的水印信息和压缩溢出图。

$$W' = \begin{cases} 1, & \text{if } \text{mod}(C',2)=0 \\ 0, & \text{if } \text{mod}(C',2)=1 \end{cases} \quad (3)$$

其中,  $W'$  为在同质块中未嵌入完的水印信息和压缩溢出图;  $C'$  表示非同质块经 IWT 后得到的中高频系数值。

Step5 对含水印图像进行分解后获取的同质块按照 2.2 节中的算法计算出块中每个像素的预测误差。

Step6 解压缩溢出图, 将各同质块中每一像素点和相应的预测误差值依据提取出的溢出信息按需进行预测差值扩展逆运算, 同时恢复图像同质块。

假设对原始图像中的任一像素对  $(x,y)$  通过差值扩展来进行水印信息的嵌入。若嵌入的水印信息为 1, 则新产生的像素对  $(a,b)$  的值为:

$$a = \frac{x+y}{2} + \frac{2(x-y)+1+1}{2} = \frac{x+y}{2} + x - y + 1$$

$$b = \frac{x+y}{2} - \frac{2(x-y)+1}{2} = \frac{x+y}{2} - x + y$$

从而有:  $a-b = x-2y+1$ 。

因此, 在任一像素对中, 当嵌入的一位水印信息为 1 时, 得到的新的像素对差值为奇数值。同理, 当嵌入的水印信息为 0 时, 得到的新的像素对差值为偶数值。通过此方法, 在恢复原始载体图像时, 若水印图像中的像素对  $(a,b)$  的差值为奇

数,则代表嵌入的水印信息为 1,否则为 0。通过此方法即可提取出水印信息。因此,若同质块中像素点值和相应的预测误差值的差值为奇数,则代表嵌入的水印信息为 1,否则为 0。

Step7 将从非同质块中获取的水印和从同质块中获取的水印按多尺度分解块排序的顺序结合在一起,并进行反置乱,从而得到最终提取的水印信息。

Step8 将提取出水印信息后的同质块和非同质块按多尺度分解块排序的顺序结合在一起,最终恢复出原始图像。

#### 4 实验结果与分析

本文实验采用 Lena 和 Barbara 等标准的 8 位灰度图像作为测试图像,图像像素大小为  $512 \times 512$ ,如图 5 所示。水印图像采用像素大小为  $32 \times 32$  的二值图像,如图 6 所示。本文所有实验均在 Windows 7 操作系统下以 MatlabR2012b 为实验平台进行仿真。



图 5 实验测试图像



图 6 水印图像

可逆图像水印算法的完整性一般采用原始图像与恢复图像之间的相关系数(Normalized Correlation, NC)来衡量。对于原始图像和恢复图像,要求 NC 值为 1,即可逆图像水印算法一般要求载体图像能够被完整恢复。

表 2 列出了采用本文算法对 4 种不同类型的含水印图像在不进行任何攻击时得到的完整性结果,其表明本文算法在未受攻击的情况下能够完全恢复出原始载体图像,从而实现图像可逆。

表 2 无攻击时的完整性评估表

| 图像(512×512) | Lena | Barbara | Baboon | Peppers |
|-------------|------|---------|--------|---------|
| NC          | 1    | 1       | 1      | 1       |

对原始载体图像进行多尺度分解(设定最小块尺寸为 44),分块后分别采用本文算法与文献[11]中的算法进行水印嵌入。通过 PSNR 和 SSIM 来比较两算法性能的优劣,具体数值如表 3 所列。

表 3 算法视觉质量分析

| 图像名称    | 本文算法  |       | 文献[11]中的算法 |       |
|---------|-------|-------|------------|-------|
|         | PSNR  | SSIM  | PSNR       | SSIM  |
| Lena    | 54.34 | 0.986 | 46.72      | 0.982 |
| Baboon  | 53.27 | 0.984 | 48.37      | 0.985 |
| Barbara | 54.41 | 0.985 | 47.54      | 0.983 |
| Peppers | 53.52 | 0.983 | 46.81      | 0.981 |

表 3 中,利用本文算法进行水印嵌入时,将原始图像分解成同质块与非同质块。在同类块中通过预测误差扩展来嵌入水印能够取得较好的视觉效果;在非同类块中通过计算信息熵来选择合适块嵌入水印也能取得较好的视觉效果。由表 3 可知本文算法的 PSNR 和 SSIM 值优于文献[11]中的算法,

这也说明了本文提出的算法具有较高视觉质量。具体的视觉效果以及水印提取效果如表 4 所列。

表 4 算法实验视觉效果

| 图像名称    | 原始图像 | 水印图像 | 原始水印 | 提取的水印 | PSNR  |
|---------|------|------|------|-------|-------|
| Lena    |      |      | 武 武  | 武 武   | 54.34 |
| Baboon  |      |      | 武 武  | 武 武   | 53.27 |
| Barbara |      |      | 武 武  | 武 武   | 54.41 |
| Peppers |      |      | 武 武  | 武 武   | 53.52 |

表 4 中所获得的 PSNR 值是按多尺度分解所得到的视觉质量。从表 4 中观测发现,人眼感觉不到水印图像中水印信息的存在。含水印图像的视觉效果较好,其相应的 PSNR 值表明本文算法对于不同类型图像都具有较好的不可感知性,平均 PSNR 值高达 53.89dB。

从表 2—表 4 可以看出,本文算法对不同纹理类型的图像都有较好的视觉感知,可以准确地提取出水印且完整地恢复出原始图像。

为了估算原始图像的最大水印嵌入容量,本文需要对原始图像中的所有块进行水印嵌入。为了计算方便并更好地分析本文算法的性能,这里将本文算法与文献[11]中的算法、文献[12]中的算法进行比较,结果如表 5 所列。

表 5 水印算法性能的比较

| 图像名称    | 算法     | Payload in bytes | SSIM  | PSNR/% |       |       |       |       |
|---------|--------|------------------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|
|         |        |                  |       | 10     | 30    | 70    | 90    | 100   |
| Lena    | 文献[12] | 246599           | 0.733 | 51.37  | 42.92 | 36.83 | 32.91 | 31.95 |
|         | 文献[11] | 9767             | 0.918 | 45.78  | 43.48 | 41.58 | 39.78 | 38.64 |
|         | 本文     | 253745           | 0.954 | 52.06  | 49.69 | 48.74 | 48.09 | 47.86 |
| Baboon  | 文献[12] | 41519            | 0.823 | 50.25  | 42.43 | 34.94 | 33.48 | 31.02 |
|         | 文献[11] | 11056            | 0.904 | 45.86  | 43.84 | 41.95 | 40.56 | 39.76 |
|         | 本文     | 247654           | 0.952 | 51.26  | 48.74 | 47.85 | 47.14 | 46.95 |
| Barbara | 文献[12] | 192740           | 0.672 | 49.12  | 48.54 | 46.80 | 45.11 | 31.65 |
|         | 文献[11] | 13232            | 0.893 | 45.66  | 42.89 | 39.54 | 37.10 | 36.65 |
|         | 本文     | 251236           | 0.951 | 52.45  | 49.87 | 48.98 | 48.29 | 48.07 |
| Peppers | 文献[12] | 138695           | 0.815 | 50.62  | 42.98 | 35.12 | 33.58 | 31.53 |
|         | 文献[11] | 8562             | 0.936 | 46.24  | 44.77 | 41.82 | 39.54 | 38.26 |
|         | 本文     | 249617           | 0.949 | 51.68  | 49.16 | 48.14 | 47.48 | 47.08 |

表 5 中的 10%、30%、70%、90%和 100%是指待嵌入水印容量占最大嵌入容量的比重。在嵌入最大嵌入容量的 10%、30%、70%、90%和 100% 时,利用 PSNR 来评估含水印图像的视觉质量。由表 5 可知,本文提出的可逆数字水印算法在有效载荷能力方面优于文献[11]中的算法和文献[12]中的算法,且具有良好的 SSIM 和 PSNR 值。其原因在于,

本文采用多尺度分解来对原始图像进行分块,考虑了图像的纹理复杂性,提高了视觉质量;在同质块中通过预测误差扩展算法来嵌入水印,并在非同质块中在 IWT 的中高频系数中嵌入水印,有效地提高了嵌入的视觉质量;在同质块中通过预测误差扩展来嵌入水印,在理想状态下嵌入率可达 1;在非同质块中在 IWT 的中高频系数中嵌入水印,其嵌入率可达 0.75。该方法有效地提高了整个算法的嵌入率并增加了嵌入容量。这里给出的结果表明,本文提出的基于多尺度分解与预测误差扩展的可逆图像水印算法大大增强了有效载荷的能力,同时仍保持了较高的视觉质量。

**结束语** 最大嵌入量和视觉质量是可逆图像水印算法中两个重要的性能评价指标,两者之间相互矛盾,在保证较好视觉质量的前提下能够有效地提高水印嵌入率是目前亟需解决的重要问题。本文基于此提出了一种基于多尺度分解和预测误差扩展的可逆图像水印算法,在提取嵌入的水印后,该算法能够无损恢复出原始图像。该算法能够有效增加水印嵌入量并且具有较高的视觉质量,其主要贡献在于和其他一些算法相比在维持较高视觉质量的前提下提高了水印嵌入率。

### 参考文献

- [1] LEI L, GUO S X, WANG L. SVD Digital Image Watermarking Algorithm Based on Wavelet Transform [J]. Computer Simulation, 2013, 30(9): 169-172, 260. (in Chinese)  
雷蕾, 郭树旭, 王雷. 基于小波变换的 SVD 数字图像水印算法研究[J]. 计算机仿真, 2013, 30(9): 169-172, 260.
- [2] TIAN J. Reversible data embedding using a difference expansion [J]. IEEE Transactions Circuits Syst. Video Technol., 2003, 13(8): 890-896.
- [3] ZHENG S L, WANG M L, XING H F, et al. A difference expansion reversible watermarking algorithm based on bit plane [J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2012, 35(10): 1345-1348. (in Chinese)  
郑淑丽, 王美玲, 邢慧芬, 等. 一种基于位平面的差值扩展可逆水印算法[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2012, 35(10): 1345-1348.
- [4] MAITY H K, MAITY S P. Reversible image watermarking using modified difference expansion [C] // 2012 Third International Conference on Emerging Applications of Information Technology (EAIT). IEEE, 2012: 320-323.
- [5] LI X L, LI J, LI B, et al. High-fidelity reversible data hiding scheme based on pixel-value ordering and prediction-error expansion [J]. Signal Processing, 2012, 93(1): 198-205.
- [6] LIN S L, HUANG C F, LIU M H, et al. Improving histogram based reversible information hiding by an optimal weight-based prediction scheme [J]. Journal of Information hiding and Multimedia Signal Processing, 2013, 1(1): 19-33.
- [7] ZHANG Z W, WU L F, LAI H G, et al. Reversible watermarking algorithm with IWT and general difference expansion [J]. Computer Engineering and Applications, 2016, 52(8): 84-89. (in Chinese)  
张正伟, 吴礼发, 赖海光, 等. 基于 IWT 和广义差值扩展的可逆水印算法[J]. 计算机工程与应用, 2016, 52(8): 84-89.
- [8] YAN Y Y, GUO Z B, YANG J Y. Face recognition based on multi-scale singular value features [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2008, 48(10): 1688-1692. (in Chinese)  
严云祥, 郭志波, 杨静宇. 基于多尺度奇异值特征的人脸识别[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2008, 48(10): 1688-1692.
- [9] LI Y Q, LI J X, LIANG Y H. Image Watermarking Algorithm based on Image Characteristics and Huffman Coding [J]. Computer Applications and Software, 2013, 30(9): 128-130, 140. (in Chinese)  
李亚琴, 李金祥, 梁颖红. 基于图像特征和霍夫曼编码的图像水印算法[J]. 计算机应用与软件, 2013, 30(9): 128-130, 140.
- [10] GAO Z Y, YANG X M, GONG J M, et al. Research on image complexity description methods [J]. Image and Journal of Graphics, 2010, 15(1): 129-135.
- [11] EL-SAYED H S, EL-ZOGHDY S F, FARAGALLAH O S. Adaptive Difference Expansion-Based Reversible Data Hiding Scheme for Digital Images [J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2016, 41(3): 1091-1107.
- [12] ABDULLAH S M, MANAF A A. Multiple Layer Reversible Images Watermarking Using Enhancement of Difference Expansion Techniques [M] // Networked Digital Technologies. Springer Berlin Heidelberg, 2010: 333-342.
- [13] WU H F, ZENG Y, FENG J H. Passive RFID tag anti-collision binary tree slotted protocol without tags quantity estimation [J]. Journal of Computer Research and Development, 2012, 49(9): 1959-1971. (in Chinese)  
吴海峰, 曾玉, 丰继华. 无标签数估计的被动 RFID 标签防冲突二进制树时隙协议[J]. 计算机研究与发展, 2012, 49(9): 1959-1971.
- [14] WU H, ZENG Y, FENG J, et al. Binary tree slotted ALOHA for passive RFID tag anticollision [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2013, 24(1): 19-31.
- [15] SU J, SHENG Z, XIE L, et al. Idle-Slots elimination based binary splitting (ISE-BS) anti-collision algorithm for RFID [J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(12): 2394-2397.

(上接第 85 页)

王鑫, 贾庆轩, 高欣, 等. 高效无线射频识别自适应跟踪树防碰撞算法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2015, 45(4): 1225-1233.

- [9] WANG X, JIA Q X, GAO X, et al. Research on grouping n-ray tracking tree RFID anti-collision algorithm [J]. Acta Electronica Sinica, 2016, 44(2): 437-444. (in Chinese)  
王鑫, 贾庆轩, 高欣, 等. 分组 N 叉跟踪树型 RFID 防碰撞算法研究[J]. 电子学报, 2016, 44(2): 437-444.
- [10] HU Y M, ZHANG X H. Research of an adaptive searching anti-collision algorithm for RFID based on information-bit encoding [J]. Acta Electronica Sinica, 2016, 44(8): 1791-1798. (in Chinese)  
胡应梦, 张小红. 基于信息位编码的自适应搜索 RFID 防碰撞算法研究[J]. 电子学报, 2016, 44(8): 1791-1798.
- [11] LA P T, MASELLI G, PETRIOLI C. Anticollision protocols for