

一种基于直方图平移和局部复杂度的可逆水印算法

吴万琴, 阮文惠, 贺元香

(兰州文理学院数字媒体学院计算机系, 甘肃 兰州 730000)

[摘要] 针对现有高容量水印嵌入算法中载体图像失真问题, 本文提出一种基于直方图平移和局部复杂度的可逆水印算法. 为确保较高的图像质量, 该算法通过局部复杂度函数来区分宿主图像块是平滑还是复杂块, 将平滑块嵌入水印信息, 复杂块保持不变, 不进行水印信息嵌入, 以获得高质量图像. 实验结果表明, 与同类算法相比, 该算法具有较好的图像质量和高嵌入容量.

[关键词] 可逆水印, 局部复杂度, 嵌入容量, 像素值

[中图分类号] TP309, TN911 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1001-4616(2016)03-0033-07

A Reversible Watermarking Algorithm Based on Histogram Shifting and Local Complexity

Wu Wanqin, Ruan Wenhui, He Yuanxiang

(School of Digital Media, Lanzhou University of Arts and Science, Lanzhou 730000, China)

Abstract: This paper proposed a reversible watermarking algorithm based on histogram shifting and local complexity in view of the existing problem of image distortion for high capacity watermarking algorithms. In order to obtain high quality image, this paper classified the cover image block into smooth blocks or complex blocks based on a local complexity function. Then, the smooth block embedded watermark information, complex blocks remained unchanged to increase embedding capacity and enhance image quality. The experimental results show that compared with other similar algorithms, this algorithm has better image quality and high embedding capacity.

Key words: reversible watermarking, local complexity, embedding capacity, pixel value

水印技术作为多媒体版权保护的一种有效手段, 已深受学术界的广泛关注. 该技术已应用于数据保密通信、数据完整性的验证、数字产品的产权保护等方面. 图像水印可分为可逆水印和不可逆水印两类. 与传统的不可逆水印相比, 可逆水印在提取宿主图像中嵌入的水印信息后还能无失真恢复原宿主图像. 利用宿主图像可逆恢复的特性, 可逆水印技术可广泛应用于图像质量要求较高的军事情报、医学诊断和法律论证等领域, 近年来得到了广泛的发展.

可逆水印最早出现在柯达公司的一项美国专利中^[1], 它利用求模的嵌入方法在图像中嵌入数据, 使得提取算法在恢复嵌入数据的同时, 还能够完全恢复原始图像, 但是该方法的嵌入容量较小且容易产生椒盐噪声. 在过去十几年里, 一系列可逆水印算法被陆续提出. 基于像素差值图像技术的早期代表性成果是 2003 年 Tian 提出的可逆差值图像扩张^[2] (difference expansion, DE), 现已广泛应用在灰度图像的空间域中, 这是一种全新的可逆水印设计. 使用该设计对标准测试图“Lena”进行测试时, 在峰值信噪比 PSNR 为 44 dB 时, 水印负载为 40 000 bit, 其嵌入容量仍有待提高. 2004 年, 基于 Tian 等人的理论研究基础, Alattar^[3]将 Tian 的方法进行了推广, 提出了不局限于像素对, 可以针对任意矢量的差值扩展变换^[4]算法, 该算法提高了嵌入能力. 2005 年, Celik^[5]等人给出了一种广义 LSB 无损信息隐藏算法, 通过把无损压缩后的预留区域像素的 LSB 信息、可修改向量区域量化差值以及秘密信息嵌入到原宿主信息中实现无损嵌

收稿日期: 2015-09-16.

基金项目: 甘肃省教育厅研究生导师项目 (1215_04).

通讯联系人: 吴万琴, 副教授, 研究方向: 多媒体信息安全. E-mail: 2335630373@qq.com

入过程,从而提取秘密信息后也能无损恢复原宿主信息. Guo 等人^[6]在 2006 年对 Alattar 算法进行改进并应用于语音信息隐藏,在权衡了嵌入容量和隐蔽性的情况下提高了算法的运行速度. 由于一些无损隐藏方法需要对可修改向量区信息进行无损压缩后再和秘密信息一起嵌入才能在提取秘密信息后无损恢复原宿主信息,从而造成嵌入秘密信息较少. 2007 年, Thodi 等人^[7]提出基于预测差值(predictable diction error, PE)的扩展算法,主要利用预测函数来预测像素值并计算像素间的差值及其预测值从而嵌入秘密信息. 上述算法都是基于 DE 理论,嵌入容量和图像质量较好. 然而,由于在嵌入过程时的扩展却导致像素出现上溢或下溢等现象. 为解决该问题,算法必须具备一个完善的位置图来判定像素是否可嵌入. 最后将位置图也同水印一起嵌入到载体图像中,但图像质量和嵌入容量就会有所下降. 2007 年 Jin 等人提出一种新的方法^[8],该方法计算可嵌入像素和其 8 邻域像素均值,通过邻域均值确定一个适当的阈值,从而保证可嵌入的像素不发生上溢或下溢现象. 但这种算法在阈值较小时,其嵌入容量却较低. 为获得较好的图像质量,一系列基于直方图平移技术的算法^[9-11]陆续提出.

1 相关理论知识

2011 年,文献[12]提出一种基于多层直方图平移技术的可逆信息隐藏技术来提高嵌入容量. 该算法中采用嵌入层数参数 L 控制嵌入容量. 嵌入容量和 L 具有直接比例关系. 具体嵌入过程如下:

嵌入算法:

载体图像 I 大小为 $M \times N$, 水印信息为 W , 其中 M, N 分别为载体图像 I 的高和宽.

步骤 1: 将宿主图像 I 转化为对像素序列 $P(p_1, p_2, \dots, p_{M \times N})$ 进行 S 扫描;

步骤 2: 根据式(1)计算差值 d_i 再根据 d_i 生成直方图 ($2 \leq i \leq M \times N$), 设直方图相应序列图点记为 $b(-255), b(-254), \dots, b(-1), b(0), b(1), \dots, b(254), b(255)$;

$$d_i = \begin{cases} p_1, & \text{如 } i = 1, \\ p_{i-1} - p_i, & \text{如 } 2 \leq i \leq M \times N. \end{cases} \quad (1)$$

步骤 3: 选择嵌入层参数 L , 如果 $L=0$ 进行步骤 4, $L>0$ 则进行步骤 5;

步骤 4: 当 $L=0$ 时, 嵌入水印信息

将右侧的浮点 $b(0)$ 以单位为 1 利用式(2)向右移动;

$$d'_i = \begin{cases} p_1, & \text{如 } i = 1, \\ d_i, & \text{如 } d_i \leq 0 \text{ 并且 } 2 \leq i \leq M \times N, \\ d_i + 1, & \text{如 } d_i > 0 \text{ 并且 } 2 \leq i \leq M \times N. \end{cases} \quad (2)$$

逐个扫描差值 d'_i ($2 \leq i \leq M \times N$), 如果每个差值都为 0, 则嵌入 1 bit 信息, 如果秘密信息 $w=0$, 则 d'_i 不变, 如果 $w=1$, 则将 d'_i 加 1, 如式(3)

$$d''_i = \begin{cases} p_1, & \text{如 } i = 1, \\ d'_i + w, & \text{如 } d'_i = 0 \text{ 并且 } 2 \leq i \leq M \times N, \\ d'_i, & \text{如 } d'_i \neq 0 \text{ 并且 } 2 \leq i \leq M \times N. \end{cases} \quad (3)$$

步骤 5: 当嵌入层参数 $L>0$ 时, 将 $b(L)$ 右侧的浮点以单位为 $L+1$ 向右平移, 然后 $b(-L)$ 左侧的利用式(4)以单位为向左平移

$$d''_i = \begin{cases} p_1, & \text{如 } i = 1, \\ d'_i + w, & \text{如 } d'_i = 0 \text{ 并且 } 2 \leq i \leq M \times N, \\ d'_i, & \text{如 } d'_i \neq 0 \text{ 并且 } 2 \leq i \leq M \times N. \end{cases} \quad (4)$$

在 $[-L, L]$ 范围内逐个扫描 d'_i , 多层嵌入方法如下:

利用式(5)嵌入秘密信息

$$d_i'' = f(x) = \begin{cases} p_1, & \text{如 } i = 1, \\ d_i', & \text{如 } -L \leq d_i' \leq L \text{ 并且 } 2 \leq i \leq M \times N, \\ 2 \times L + w, & \text{如 } d_i' = L \text{ 并且 } 2 \leq i \leq M \times N, \\ -2 \times L - w + 1, & \text{如 } d_i' = -L \text{ 并且 } 2 \leq i \leq M \times N. \end{cases} \quad (5)$$

当 $L \neq 0$ 时,重复利用式(5)嵌入秘密信息,并将 L 逐步减 1;当 $L=0$ 时,利用式(6)进行如下操作:

$$d_i'' = \begin{cases} p_1, & \text{如 } i = 1, \\ d_i' + w, & \text{如 } d_i' = 0 \text{ 并且 } 2 \leq i \leq M \times N, \\ d_i', & \text{如 } d_i' \neq 0 \text{ 并且 } 2 \leq i \leq M \times N. \end{cases} \quad (6)$$

步骤 6:利用式(7)产生隐秘像素序列 P' :

$$p_i' = \begin{cases} p_1, & \text{如 } i = 1, \\ p_{i-1} - d_i'', & \text{如 } 2 \leq i \leq M \times N. \end{cases} \quad (7)$$

步骤 7:将上一步得到的隐秘像素序列 P' 组合起来则形成水印图像 I' .

2 本文算法

本文利用了直方图平移技术.为提高嵌入容量和确保含水印图像质量,将块分成复杂或平滑块.由于复杂块嵌入容量比平滑块小,且比平滑块失真大.复杂块不嵌入水印信息以保证含水印图像质量.为提高嵌入容量,具体算法过程如下:

本文算法中,大小为 $M \times N$ 的载体图 I ,其中 M 、 N 分别为载体图像的高和宽.对于每个块,中心像素 C_i 是参考像素,其周围的 8 个为非参考像素.对于参考像素非边缘的块,有 4 个其它的参考像素 $C_i^l, C_i^r, C_i^u, C_i^d$,它们分别位于参考像素 C_i 的上下左右.这些像素定义为参考像素 C_i 的随体参考像素,如图 1.

局部复杂度计算,用于定义像素块是光滑块还是复杂块

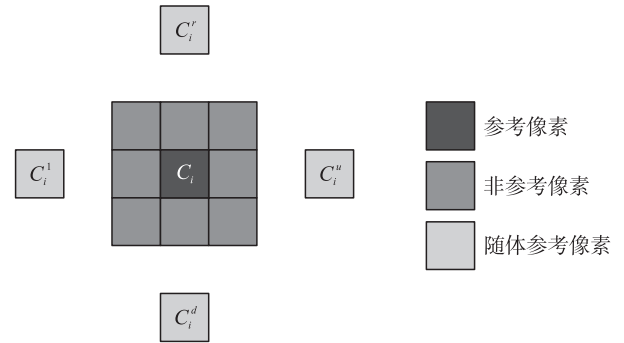


图 1 $M \times N$ 载体图像

Fig.1 Carrier image of $M \times N$

$$LC_i = \text{Range}(C_i^l, C_i^r, C_i^u, C_i^d) \quad (8)$$

$\text{Range}(C_i^l, C_i^r, C_i^u, C_i^d)$ 函数的功能是:4 个随体相关像素最大和最小绝对方差.如果 $LC < T$,则当前处理块在平滑区域,可以获得较多用于承载载体的像素.

2.1 信息嵌入过程

嵌入过程:

直方图平移:嵌入信息后,将像素值以单位为 1 平移,原来像素值为 0、255 变换为 -1、256,这意味着可能发生上溢/下溢.为避免此类问题发生,像素值为 0 和 255 的位置信息采用同文献[11]相同的方法一同记录到位置图 L 中,因此,像素值将变换为 1 和 254.信息提取过程中,附加信息,包括位置图 L 和边信息在信息提取前进行重构.载体图像 I 分成两个区域,如图 2,嵌入区域和非嵌入区域,嵌入区域用于嵌入秘密信息和非嵌入区域像素的 LSBs,非嵌入区域用于记录采用 JBIG-kit 方法压缩后的位置图 L 和边界信息.因此,非嵌入区像素的 LSBs 必须提取出来,和秘密信息 B 一起形成要嵌入的信息 S .

扫描路径: $C_i - P_2 - P_1, C_i - P_4 - P_3, C_i - P_6 - P_5, C_i - P_8 - P_7$,如图 3.

具体嵌入过程:

(1)载体图像 I 按照图 2 分成两个区域,非嵌入区保有最下面两行和最右边两列.非嵌入区域像素的



图 2 载体图像可嵌入和非嵌入图像区域划分

Fig.2 Vector image region partition of the embedded and non-embedded

LSB 用于位置图 L 的信息和边信息. 因此, 非嵌入区的像素的 LSB 必去提取并嵌入到秘密信息 B 中组成嵌入信息 S ;

(2) 扫描图像 I 记录像素值为 0 和 255 像素的位置, L 和边信息一起形成附加信息稍后处理. 然后将像素值为 0 和 255 的像素分别修改为 1 和 254, 修改后载体为 I' ;

(3) I' 分成大小为 3×3 小块, 然后将块按照式(8)分成平滑块 S 和复杂块 C ;

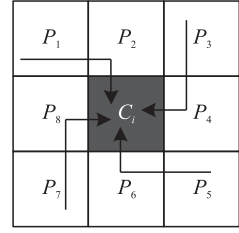


图3 扫描路径

Fig.3 Scanning path

(4) 对于平滑块 S 中的每个块 B_i , 按照式(9)计算 B_i 中非相关像素方差值 d_i ;

$$\begin{aligned} d_1 &= P_1 - P_2, \\ d_2 &= P_2 - C_i, \\ d_3 &= P_3 - P_4, \\ d_4 &= P_4 - C_i, \\ d_5 &= P_5 - P_6, \\ d_6 &= P_6 - C_i, \\ d_7 &= P_7 - P_8, \\ d_8 &= P_8 - C_i. \end{aligned} \quad (9)$$

(5) 产生非相关像素的方差直方图. 然后得到直方图峰值和零值对 (PP_1, ZP_1) 和 (PP_2, ZP_2) , 如果形成过程无损耗时可以假设 $ZP_1 < PP_1 < PP_2 < ZP_2$, 且 $(PP_1, ZP_1) \cap (PP_2, ZP_2) = \emptyset$;

(6) 扫描差值 d_i , 如果 $d_i = PP_1$ or $d_i = PP_2$, 从嵌入信息 S 中提取出的嵌入秘密信息 s , 通过式(10)修改方差值 d_i 为 d'_i , 然后利用式(11)修改 d_i ;

$$d'_i = \begin{cases} d_i, & \text{如 } s = 0, \\ d_i - 1, & \text{如 } s = 1 \text{ 并且 } d_i = PP_1, \\ d_i + 1, & \text{如 } s = 1 \text{ 并且 } d_i = PP_2. \end{cases} \quad (10)$$

$$d'_i = \begin{cases} d_i - 1, & \text{如 } ZP_1 < d_i < PP_1, \\ d_i + 1, & \text{如 } PP_2 < d_i < ZP_2, \\ d_i, & \text{其他情况.} \end{cases} \quad (11)$$

(7) 重复执行步骤 6, 直到嵌入信息 S 全部嵌入;

(8) 利用式(12)构建隐秘图像块

$$\begin{aligned} P'_1 &= d'_1 + P_2, \\ P'_2 &= d'_2 + C_i, \\ P'_3 &= d'_3 + P_4, \\ P'_4 &= d'_4 + C_i, \\ P'_5 &= d'_5 + P_6, \\ P'_6 &= d'_6 + C_i, \\ P'_7 &= d'_7 + P_8, \\ P'_8 &= d'_8 + C_i. \end{aligned} \quad (12)$$

所有过程处理后, 隐秘块分组后得到了隐秘图像 I' 和附件信息(包括位置图 L , 边信息, $ZP_1, ZP_2, PP_1, PP_2, T$ 左下信息将通过 JBIG-kit 无损压缩)压缩后的信息流记做 E , 然后将 E 通过 LSB 嵌入到载体图像的最底两行和最右侧两行, 从而得到了隐秘图像 I'' .

2.2 提取过程

(1) 用和嵌入过程相同的方法将隐秘图像 I' 分成两个区, 嵌入和非嵌入区. 然后, 提取出非嵌入区的像素的 LSBs, 得到压缩的信息流 E , 它包括 L 、边信息, $ZP_1, ZP_2, PP_1, PP_2, T$;

- (2)将隐秘图像的嵌入区分成大小为 3×3 小块,然后将这些块分为光滑 S 和复杂块 C ;
 (3)平滑块 S 中的 B_i' ,利用式(9)计算其非相关像素的差值 d_i' ;
 (4)利用和嵌入过程相同序列的方法扫描差值 d_i' ,如果 d_i' 已记录在 L 中,计算下一个差值,否则的话利用式(13)提取出秘密信息 s ,载体图像差值 d_i 通过式(14)进行重建;

$$s = \begin{cases} 0, & \text{如 } d_i' = PP_1 \text{ 或者 } d_i' = PP_2, \\ 1, & \text{如 } d_i' = PP_1 - 1 \text{ 或者 } d_i' = PP_2 + 1. \end{cases} \quad (13)$$

$$d_i = \begin{cases} d_i' + 1, & \text{如 } ZP_1 < d_i < PP_1, \\ d_i' - 1, & \text{如 } PP_2 < d_i < ZP_2, \\ d_i', & \text{其他情况.} \end{cases} \quad (14)$$

- (5)重复步骤 4,直到所有信息都提取出来;
 (6)利用式(15)重建修改后的图像块 B_i ,利用分组后的修改块形成修改图像 I' ;

$$\begin{aligned} P_1 &= d_1 + P_2, \\ P_2 &= d_2 + C_i, \\ P_3 &= d_3 + P_4, \\ P_4 &= d_4 + C_i, \\ P_5 &= d_5 + P_6, \\ P_6 &= d_6 + C_i, \\ P_7 &= d_7 + P_8, \\ P_8 &= d_8 + C_i. \end{aligned} \quad (15)$$

完成以上 6 步以后,水印图像 I' 将完全恢复,根据嵌入信息 S 恢复原始图像 I ,利用 LSBs 方法提取出非嵌入区域像素的 LSBs.

3 算法综合性能与其他文献方法比较

本文所有实验均在 Dell 笔记本电脑,i3 CPU,2G 内存,Win7 操作系统下以 MATLAB7.8 为实验平台得到.在图像库中选择 4 幅典型、标准的具有不同纹理特征的 512×512 的 8 bit 灰度载体图像如图 4(a)–4(d),包括 Lena,Plane,Baboon 和 Pepper,采用随机函数(rand)随机生成的随机比特序列作为水印信息.

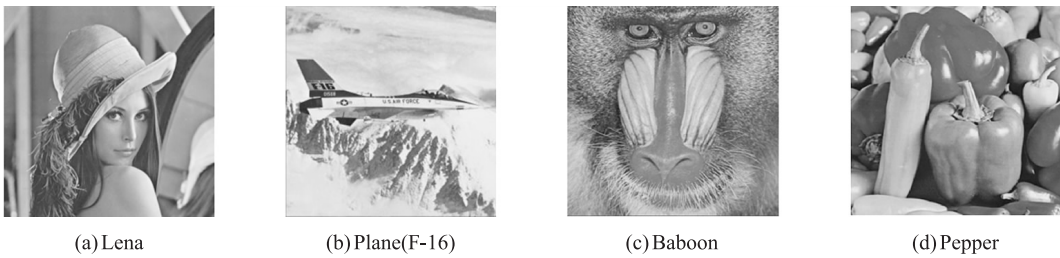


图 4 实验采用的载体图像

Fig.4 Experimental carrier images

客观上采用峰值信噪比(PSNR)作为性能评价指标,其中 MSE 表示原始载体图像和含水印图像之间的均方误差值, W, H 分别为测试图像的宽度和高度. $I(i, j)$ 和 $I'(i, j)$ 分别表示载体图像和含水印图像的像素值.

$$\text{PSNR} = 10 \times \log_{10} \frac{255^2}{\text{MSE}} \quad (\text{dB}), \quad (16)$$

$$\text{MSE} = \frac{1}{W \times H} \sum_{i=1}^W \sum_{j=1}^H (I(i, j) - I'(i, j))^2. \quad (17)$$

水印容量指可以有效通过具体某一个可逆图像水印算法嵌入到载体图像中并能够完整提取的有效水印量,有效水印容量(也称净容量)等于水印总载荷减去辅助信息量,通常我们用像素嵌入比特数(Bpp,

bit per pixel)来表示.在可逆图像水印中,虽然原始图像可被完全恢复,但按水印算法的一般要求,峰值信噪比(PSNR)和水印容量(Bpp)都越大越好.

实验 1:表 1 描述了采用本文算法得到的几个峰值直方图点.由表可见,平均看来,值点都在 0 点附近,本文提出的算法可以获得较高的峰值直方图.当峰值点直方图点频率较高时,则获得较高的嵌入容量.此外,因本文提出的嵌入过程只是用于平滑块中,所以,在相同的嵌入容量时获得了较好的图像质量.

表 1 采用本文算法得到的峰值点值
Table 1 The peak values obtained by this algorithm

实验图像	histogram bins								
	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
Lena	9 351	13 490	19 223	24 721	57 860	24 500	18 968	13 728	9 223
Plane	7 212	11 650	18 045	29 122	69 910	29 264	17 830	11 710	7 197
Baboon	6 906	7 675	8 167	8 585	38 773	8 454	8 082	7 718	6 851
Pepper	10 665	14 526	19 648	23 839	55 499	23 672	19 444	14 603	10 572

图 5 为采用本文算法对 4 幅不同类型载体图像嵌入水印后生成的相应可逆水印图像,并给出峰值信噪比 PSNR 值.从图 5 观测发现,人眼感觉不到水印图像中的水印信息的存在,含水印图像视觉效果较好,边缘及纹理间肉眼根本看不出异样.客观上其相应的 PSNR 值均高于 40 dB,对 4 中载体图像进行实验后得到具体 PSNR 值已在图中标注中列出,平均 PSNR 值高达 40 dB,这些数值足以说明对不同类型图像本文算法具有较好的不可感知性.

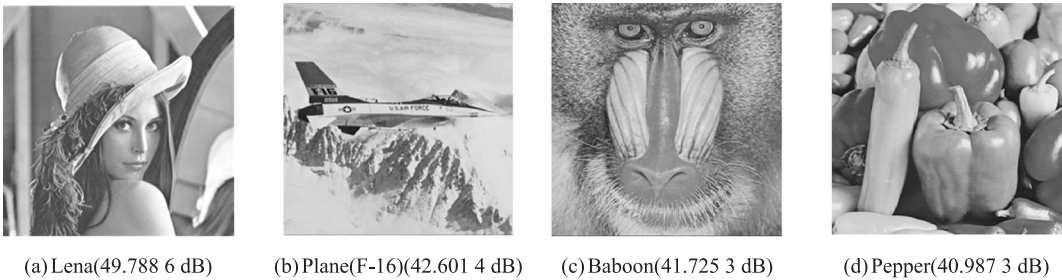


图 5 基于本文算法的可逆水印图像
Fig.5 Reversible watermarking algorithm based on text algorithm

实验 2:为了验证本文算法的优越性,选取相同的载体图像与文献[12-15]进行了相应的对比实验.由表 2 可以看出,采用本文算法得到的嵌入容量值均高于其他 4 个文献中相同水印载体图像的嵌入容量值,当载体图像为 Lena 时,得到了最大嵌入容量 0.95,平均嵌入容量为 0.67,最大嵌入容量高于其他 4 种方法中最大嵌入容量文献[12]的平均嵌入容量 0.14,平均嵌入容量高于其他 4 种方法中最大平均嵌入容量文献[12]的平均嵌入容量 0.172.不同载体图像得到的水印图像的 PSNR 值也相对较高,Lena 水印图像

表 2 不同算法对比实验
Table 2 Contrast experiment of different algorithms

文献	性能	Lena					Plane(F-16)					Baboon					Pepper				
文献	Bpp	0.03	0	0.06	0.1	0.1	0.05	0.1	0.15	0.2	0.24	0.02	0.03	0.05	0.1	0.07	0.02	0	0.1	0.1	0.08
[13]	PSNR	48.5	43	39.5	37	35	38.5	43	39.5	37	35.5	48	42.5	38.5	37	34.5	48.5	42	40	38	34.5
文献	Bpp	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.15	0.4	0.54	0.7	0.71	0.02	0.07	0.12	0.2	0.21	0.06	0.2	0.3	0.4	0.5
[14]	PSNR	48.5	45	42	41	39	48.5	43	40	38	36.8	48	42.5	39	37	35	48.5	43	40	38	36
文献	Bpp	0.26	0.4	0.5	0.7	0.8	0.3	0.4	0.61	0.7	0.84	0.08	0.16	0.23	0.3	0.34	0.17	0.3	0.5	0.5	0.6
[15]	PSNR	48.5	45	41.8	38	36.8	49	43	40	38	36.5	48.5	42.2	39	38	35.5	49	44	41	40	37.5
文献	Bpp	0.1	0.3	0.55	0.7	0.81	0.17	0.4	0.52	0.7	0.85	0.02	0.1	0.23	0.4	0.45	0.2	0.3	0.4	0.5	0.61
[12]	PSNR	51	45	39	36	34	51	45	42	38	35	50.5	44	36	34	31	45	41	39	37	32
本文	Bpp	0.3	0.5	0.68	0.9	0.95	0.3	0.5	0.68	0.8	0.94	0.07	0.18	0.31	0.41	0.4	0.25	0.4	0.6	0.7	0.82
方法	PSNR	49	46	42.4	39	36.9	49.5	46	42	37	38	48.5	44	40	39	36.4	49.5	46	42	40	37.5

的 PSNR 最大值达到 49 dB,平均值 42.668 dB;Plane(F-16)水印图像的 PSNR 最大值达到 49.5 dB,平均值 42.5 dB;Baboon 水印图像的 PSNR 最大值达到 48.5 dB,平均值 41.58 dB;Pepper 水印图像的 PSNR 最大值达到 49.5 dB,平均值 43 dB,采用本文算法得到的水印图像的平均 PSNR 值均高于 40 dB,图像质量相当高,而且嵌入容量较其他 4 种算法都高,由此可见本文算法的优越性。

4 结论

本文根据目标像素的随体参考像素来判定某像素块类型,提出一种基于直方图平移和局部复杂度的可逆水印算法,实现了无失真的恢复载体图像。算法中首先将图像进行分块,然后采用了一个参考像素和邻域像素的局部复杂度函数来判定当前像素块类型,如果是平滑块则嵌入水印信息,复杂块则保持不变。实验结果表明,与同类中较经典的算法相比,本文算法得到的图像质量较好,水印嵌入容量较高,由此充分证明了本文算法的优越性。

[参考文献]

- [1] HONSINGER C W, JONES P, PABANI M, et al. Lossless recovery of an original image containing embedded data: 77102/E-C [P]. 1998-11-10.
- [2] TIAN J. Reversible data embedding using a difference expansion[J]. IEEE Trans Circuits Syst Video Technol, 2003, 13(8): 890-896.
- [3] LATTE A M. Reversible watermark using the difference expansion of a generalized integer transform [J]. IEEE Trans on Image Processing, 2004, 32(8): 1 147-1 156.
- [4] COLUCE, CHASSERY J M. Very fast watermarking by reversible contrast mapping[J]. IEEE signal process letter, 2007, 14(4): 255-258.
- [5] CELIK M U, SHARMA G, TEKALP A M, et al. Lossless generalized LSB data embedding[J]. IEEE transactions on image processing, 2005, 14(2): 253-266.
- [6] 郭志川, 程义民, 王以孝, 等. 一种无损的隐秘传输方法与仿真[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(6): 1 638-1 642.
- [7] THODI D M, RODRIGUEZ J J. Expansion embedding techniques for reversible watermarking[J]. IEEE transactions on image processing 2007, 16(3): 721-30.
- [8] JIN H L, FUJIYOSHI M, KIYA H. Lossless data hiding in the spatial domain for high quality images[J]. IEICE transactions on fundamentals of electronics, communications and computer sciences, 2007, E90-A(4): 771-777.
- [9] WANG X T, CHANG C C, NGUYEN T S, et al. Reversible data hiding for quality images exploiting interpolation and direction order mechanism[J]. Digital signal processing, 2013, 23(2): 569-577.
- [10] WANG K H, LIU Q, CHEN L. Hierarchical reversible data hiding based on statistical information: preventing embedding unbalance[J]. Signal processing, 2012, 92: 2 888-2 900.
- [11] 王俊祥, 倪江群, 潘金伟. 一种基于直方图平移的高性能可逆水印算法[J]. 自动化学报, 2012, 38(1): 88-96.
- [12] ZHAO Z F, LUO H, LU Z M, et al. Reversible data hiding based on multilevel histogram modification and sequential recovery[J]. International journal of electronics and communications, 2011, 65(10): 814-826.
- [13] WU X Y. Reversible semi-fragile watermarking based on histogram shifting of integer wavelet coefficients[C]//Proceedings of the Digital Ecosystems and Technologies Conference, Cairns, Australia; IEEE, 2007: 501-505.
- [14] LIN C C, TAI W L, CHANG C C. Multilevel reversible data hiding based on histogram modification of difference images[J]. Pattern recognition, 2008, 41(12): 3 582-3 591.
- [15] HWANG J, KIM J, CHOI J. A reversible watermarking based on histogram shifting[C]//Proceedings of the International Workshop on Digital Watermarking, Jeju Island, Korea: Springer, 2006: 348-361.

[责任编辑:陆炳新]