

一种基于直方图平移的高性能可逆水印算法

王俊祥^{1,2} 倪江群¹ 潘金伟¹

摘要 近年来, 基于直方图平移的可逆水印算法因其生成水印图像质量高而被广泛研究. 目前大部分相关水印算法是非盲的, 需要额外传送峰值/零点对等边信息. 已有的相关盲水印算法由于采用固定的峰值/零点对而性能较差. 本文提出一种面向差值域多层嵌入的高性能直方图平移盲可逆水印算法, 有关同步机制可保证在每层嵌入时都选择最优的峰值点和零点. 对于单层嵌入, 提出两步嵌入法 (Two-step embedding, TSE) 同步机制, 将边信息嵌入到第一步生成的水印像素最低有效位以实现盲提取; 对多层嵌入, 则进一步提出链式嵌入同步机制, 并在最后层采用两步嵌入法以保证水印盲提取. 仿真结果表明, 本文算法不但可以实现盲提取的要求, 而且在算法性能方面较同类算法有显著的提高.

关键词 图像水印, 直方图平移, 可逆水印, 盲水印, 两步嵌入法

DOI 10.3724/SP.J.1004.2012.00088

A High Performance Reversible Watermarking Scheme Based on Histogram Shifting

WANG Jun-Xiang^{1,2} NI Jiang-Qun¹ PAN Jin-Wei¹

Abstract In recent years, histogram shifting based reversible watermarking has become the domain of extensive research due to its high stego-image quality. Most related schemes are required to transmit extra side information, e.g. peak and zero point pairs, and therefore are non blind in nature. The existing blind schemes, however, exhibit relatively poor performance due to the adoption of fixed peak and zero point pairs. This paper presents a histogram shifting based multi-level embedding scheme for blind reversible watermarking. For single level embedding, a two-step embedding (TSE) approach is proposed, which hides the side information in the stego-image generated with first embedding for blind requirement. While for multi-level embedding, a chain embedding is further incorporated, which ensures both the blind requirement and adoption of optimal peak and zero point pair in each level for high performance reversible watermarking. Extensive simulations are carried out to demonstrate that the proposed scheme could not only achieve the blind reversible watermarking but also outperform other similar ones.

Key words Image watermarking, histogram shifting, reversible watermarking, blind watermarking, two step embedding (TSE)

近年来, 作为多媒体版权保护的一种有效手段, 数字水印技术^[1] 引起学术界的广泛关注. 传统的数字水印方法强调水印的不可感知性、鲁棒性^[2-4] 和容量; 尽管水印嵌入导致的载体失真一般不可感知, 但军事、医疗和司法领域的某些特殊应用场合往往不允许出现具有永久性失真的水印载体. 于是, 可逆水印技术应运而生; 可逆水印要求解码器不仅能无失真地提取水印, 而且在提取水印后可无失真地恢复原始作品.

近年来, 一系列可逆水印方法被陆续提出^[5-18],

目前的可逆水印主要分为 3 类: 基于图像压缩的方法^[6-7]、基于差值扩展的方法 (差扩法)^[8-13] 和基于直方图平移的方法^[14-18]. 基于压缩的可逆水印算法通过对载体特定区域进行无损压缩, 并在空出的载体空间嵌入水印信息. 该类算法一般选择载体中视觉掩蔽和冗余较大的区域进行压缩; 在文献 [6] 中, Fridrich 等通过对 JPEG 图像离散余弦变换 (Discrete cosine transform, DCT) 量化系数最低有效位的无损压缩来嵌入水印信息, 此后 Celik 等^[7] 提出一种基于 LSB (Least significant bit) 压缩的通用模型, 并给出了基于位平面的可逆水印方案. 考虑到 LSB 的数据冗余较小, 该类算法的水印嵌入容量有限. Tian 首先提出了基于差值扩展的可逆水印方法^[8], 该算法先根据相邻像素的预测生成当前像素的差值, 然后, 对有关差值进行左移扩展并在空出的最低位嵌入 1 bit 信息. Alattar^[9] 对 3 个 (或 4 个) 相邻像素的差值采用差扩法嵌入 2 bit (或 3 bit) 水印. Thodi 等^[10] 对每个像素与其预测值的差采用差扩法嵌入水印, 并利用直方图修改技术解决位置图传递的问题.

收稿日期 2010-12-09 录用日期 2011-07-16
Manuscript received December 9, 2010; accepted July 16, 2011
国家自然科学基金 (60970145) 资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (60970145)
本文责任编辑 黄继武
Recommended by Associate Editor HUANG Ji-Wu
1. 中山大学信息科学与技术学院 广州 510006 2. 景德镇陶瓷学院 景德镇 333403
1. School of Information Science and Technology, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006 2. School of Mechanical and Electronic Engineering, Jingdezhen Ceramic Institute, Jingdezhen 333403

基于直方图平移的可逆水印方法由 Ni 等人在文献 [14] 中提出, 并因其低计算复杂度和较高的水印图像质量而获得业内的广泛重视. 该方法根据载体直方图的零点和峰值点进行直方图平移操作, 并嵌入秘密信息. 其后, 利用图像小波系数具有类拉普拉斯分布的特点, Xuan^[15] 和 Wu^[16] 相继提出了基于整数小波变换的直方图平移算法, 并获得了较高的嵌入容量和水印图像质量. 近期, 文献 [17–18] 又给出了基于预测误差的直方图平移技术, 进一步改进了相关水印算法的性能. 以上直方图平移算法都需要额外传输峰值点/零点边信息, 在很大程度上降低了算法的实用性. 文献 [9] 给出了一种基于像素域的盲可逆水印, 该方法以直方图中的最高频率像素值作为同步参考, 取其相邻像素值作为“峰值点”实现直方图平移水印嵌入. 其后, Tai 等^[19] 给出基于差值域的盲水印方法, 考虑到图像预测误差服从零均值类拉普拉斯分布, Tai 等提出了基于固定直方图峰值/零点对的盲可逆水印方法. 以上盲直方图平移水印方法都选择固定的直方图峰值/零点对, 而固定的方式一般不能保证选择到最优的峰值/零点对, 从而直接影响到算法的性能. 本文提出了一种基于多层嵌入的直方图平移盲可逆水印算法, 可以保证在每层嵌入时选择最优的峰值/零点对, 并设计了相应的同步机制. 本文提出了两步嵌入法 (Two-step embedding, TSE) 同步机制, 将边信息嵌入到第一步生成的水印像素最低有效位以实现盲提取. 对多层嵌入, 则进一步提出链式嵌入同步机制, 并在最后层采用两步嵌入法以保证水印盲提取. 仿真结果表明: 本文算法较之目前的盲可逆水印算法^[19–20] 在性能上有显著的提升.

本文第 1 节简要介绍了基于直方图平移的可逆水印方法及其性能评估模型; 第 2 节给出了本文的算法; 第 3 节为实验仿真结果和分析; 第 4 节为本文的结论.

1 基于直方图平移的可逆水印及性能评估模型

1.1 基于直方图平移的可逆水印方法

直方图平移的可逆水印方法通过对载体直方图的平移操作实现高性能可逆水印嵌入^[14]. 以下给出基于图像像素一次直方图平移操作的简要说明: 首先, 根据载体图像生成直方图, 搜索直方图中像素灰度频率最大的“峰值点”, 记其为 P . 判断直方图中是否存在灰度频率为零的“零点”. 如果存在, 记零点为 Z , 称为“有零点情形”, 如图 1(a) 所示; 如果不存在灰度频率“零点”, 称为“无零点情形”, 如图 1(b) 所示. 对于后者, 需要寻找一个频率最小点, 记

为 L , 并利用一个与图像大小一致的 Bitmap 记录 L 在载体图像中出现的位置用于在接收端恢复载体. 经压缩的 Bitmap 作为水印的一部分嵌入到载体中, 并将 L 的灰度值置零, 此时可将“无零点情形”转化为“有零点情形”进行嵌入.

对于“有零点情形”, 可将峰值点与零点匹配成对, 然后, 将位于峰值点与零点之间的直方图 Bin 沿零点方向平移一位, 此时, 原零点交换到峰值点旁, 如图 1(c) 所示. 扫描原图像, 遇峰值点像素时, 嵌入 1 bit 水印: 对于信息“0”, 像素值保持不变; 对于信息“1”, 像素值变为相邻的零点 (像素值加/减 1), 结果如图 1(d) 所示.

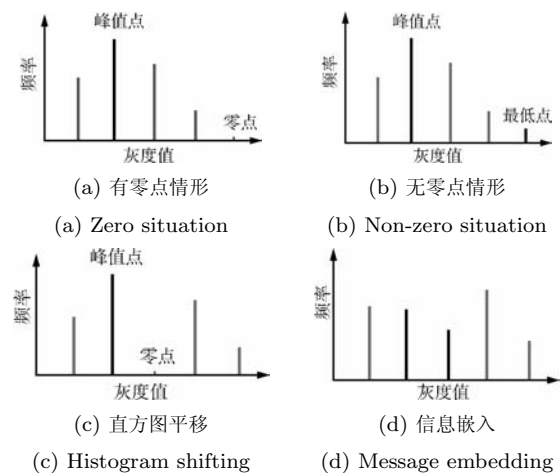


图 1 直方图平移技术示意图

Fig. 1 The illustration of histogram shifting technique

显然, 当直方图陡峭、零点较多时, 水印嵌入容量较高; 而当直方图平坦, 无零点存在, 且 P 与 L 的值相差不大时, 几乎不可能嵌入水印信息. 根据像素预测模型可以得到预测误差图像 (以后称为图像差值域), 差值域图像服从类拉普拉斯分布, 相关直方图在均值附近分布集中且有较大频率的峰值点, 故一般基于差值域的直方图平移方法可以获得较好的性能. 本文给出的可逆水印方法即是基于差值域的, 在差值域嵌入水印后, 可经反变换生成水印图像.

1.2 直方图平移方法的性能评估模型

文献 [21–22] 提出了直方图平移方法的通用模型, 并给出有关嵌入容量和水印图像的质量估计公式. 如图 2 所示, 假设 P_1 和 Z_1 为选择的峰值点和零点对:

1) 嵌入容量: 在水印信息的嵌入过程中, 只有当扫描图像遇到 P_1 时才会嵌入 1 bit 信息, 故可由直方图的 P_1 准确计算嵌入容量:

$$Capacity = h(P_1) \quad (1)$$

式中, $Capacity$ 表示嵌入容量, P_1 为峰值点, $h(\cdot)$

表示取直方图频率。

2) 水印图像质量: 水印的嵌入只会修改 P_1 与 Z_1 之间的像素值和 P_1 自身的部分像素值, 记其失真分别为 D_m 和 D_s . 由于直方图每次平移的幅度为“1”, 故 P_1 与 Z_1 之间的像素值的变化值也为“1”. 对于 P_1 自身, 考虑其一般修改为相邻像素值且 P_1 的最大变化量为“1”, 假定有一半 P_1 值发生变化 (表示嵌入信息“1”), 则以均方误差 (Mean square error, MSE) 表示的水印图像失真为

$$D = D_s + D_m \quad (2)$$

$$D_m = \frac{1}{size} \times \left(\sum_{i \in U(P_1, Z_1)} h(i) \times (\Delta i)^2 \right) = \quad (3)$$

$$\frac{1}{size} \times \sum_{i \in U(P_1, Z_1)} h(i), \quad \Delta i = 1$$

$$D_s = \frac{1}{size} \times \left(\sum_{(j=P_1) \& (w='1')} (\Delta j)^2 \right) = \quad (4)$$

$$\frac{1}{2} \times \frac{1}{size} \times h(P_1), \quad \Delta j = 1$$

式中, $size$ 表示图像大小, $U(a, b)$ 表示 a, b 间的一个开区间; Δx 表示参数 x 的变化量, w 表示当前需要嵌入的秘密信息内容。

显然, 当所选择的峰值点频率越高时算法的容量越大; 而峰值点和零点间的距离越小时, 需要平移的像素个数越少, 失真 D_m 越小. 有关模型和性能评估公式可构成本文算法设计的基础。

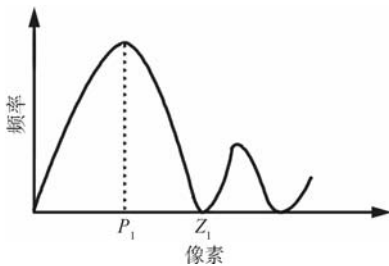


图 2 直方图平移的通用模型

Fig. 2 The general model of histogram shifting

2 基于直方图平移的可逆盲水印算法

本节首先说明单层和多层嵌入的同步和溢出控制机制, 并以此为基础给出完整的差值域直方图平移盲可逆水印算法。

2.1 单层嵌入的同步机制

单层嵌入是指经过一次直方图平移操作可完成水印信息嵌入的过程. 当嵌入水印较小时, 一般用单层嵌入. 对于单层嵌入, 可直接使用本文提出的“两

步嵌入法”框架, 参见图 3, 该同步方法同时适用于单层和多层嵌入. 通过该框架, 算法可将直方图峰值/零点对等边信息嵌入到水印图像中, 无需额外传送。

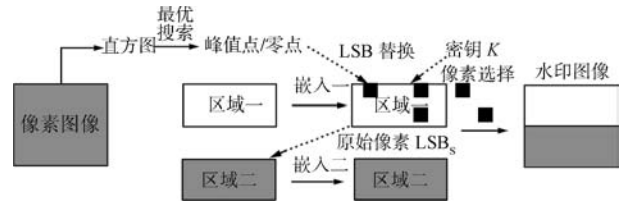


图 3 两步嵌入法示意图

Fig. 3 The illustration of two-step embedding

“两步嵌入法”描述如下:

1) 峰值点和零点选择: 根据原载体或差值域图像生成直方图, 选择最优的峰值/零点对. 由第 1.2 节的通用模型, 选择直方图中最高频率点作为“峰值点”, 并以直方图中距峰值点最近零频率点为“零点”。

2) 第一步嵌入: 如图 3 所示, 将原始载体分成两个区域, 其中用以嵌入边信息的区域记为“区域一”, 其他为“区域二”. 利用确定的最优峰值和零点对“区域一”进行直方图平移操作并嵌入部分水印信息。

3) 边信息的嵌入: 根据密钥 K 确定“区域一”中用于隐藏峰值/零点对边信息的水印像素位置. 利用最低有效位 (LSB) 替换技术将直方图的峰值点和零点信息隐藏到相应水印像素的 LSB 中。

4) 第二次嵌入: 利用直方图平移技术将剩余水印信息和原替换像素的 LSBs 一并嵌入到“区域二”。

水印接收端根据密钥 K 确定“区域一”中水印像素位置, 从其 LSBs 中提取峰值点和零点信息, 并据此对“区域二”实施水印提取和载体恢复. 其后, 基于获得的替换像素 LSBs 信息恢复“区域一”中水印像素的 LSBs, 并对“区域一”作水印提取和载体恢复。

对于灰度级为 256 的图像, 描述其灰度差值的绝对值信息需 8 bit, 故隐藏 1 个峰值/零点对需要 16 个替换像素. 利用两步嵌入法可在载体分块之前选择最优的峰值/零点对以保证可逆水印的性能, 而将边信息嵌入至“区域一”水印像素的 LSBs 中可保证接收端的水印同步。

对于 2 个区域的选择, 可以简单地采用图像的上下两部分. 具体面积比例可由密钥控制, 但要保证“区域一”的大小足以隐藏各层峰值/零点对等边信息. 考虑到边信息数据量很小, 该要求是容易满足的。

2.2 多层嵌入的同步机制

多层嵌入 (Multi-layer) 指将上次嵌入的水印图

像作为新载体实施直方图平移的可逆水印方法, 主要应用于较大嵌入容量的场合. 一般地, 多层嵌入较一次选择多组峰值点/零点对的多次嵌入 (Multiple) 可以获得较高的性能. 在计算量方面, 多层嵌入算法因需要在每层嵌入时扫描图像生成新直方图使计算复杂度有所增加. 考虑到此类计算开销非常小, 而且对于实际应用嵌入层数 $m \leq 5$, 故多层嵌入算法增加的复杂度有限.

对于多层嵌入, 为实现多层盲水印嵌入, 除采用“两步嵌入法”外, 还需要配合使用相应的“链式嵌入”方法.

假定第 i 层嵌入选择的最优峰值点和零点分别记为 P_i 和 Z_i , 参见图 4, 有关链式嵌入方法描述如下:

- 1) 估计嵌入层数 m : 根据水印信息大小及载体图像生成的直方图估计多层嵌入的层数 m .
- 2) 链式嵌入: 对载体图像进行多层直方图嵌入, 每层嵌入均选择最优的峰值点和零点直至第 $m-1$ 层, 将前 $m-1$ 层的峰值/零点对边信息记录至数列 A 中.
- 3) 第 m 层嵌入: 如图 4 所示, 根据第 2.1 节对第 m 层作两步嵌入, 并将边信息数列 A 和第 m 层边信息一起作为同步信息嵌入到两步嵌入法的“区域一”中, 即利用 LSB 替换的方式将前 m 层的边信息全部嵌入到第 m 层图像的“区域一”中. 由于每层嵌入产生的边信息数量很小, 可保证边信息的完全嵌入.

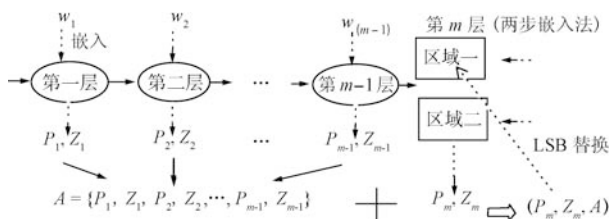


图 4 链式嵌入示意图

Fig. 4 The sketch map of chain embedding

在接收端, 首先根据密钥 K 从替换像素的 LSB 位置提取每层的边信息, 然后, 按与嵌入过程相反的秩序, 逐个像素进行 m 层恢复. 为提高算法的安全性, 可利用密钥将前 m 层的边信息作置乱和加密处理后再嵌入. 需要说明的是, 由于本文算法是在差值域作直方图平移, 接收端的像素恢复需逐个迭代完成, 即对像素进行一次性的 m 层恢复, 然后, 用所恢复像素计算下一水印像素差值并用于该水印像素恢复 (具体图像恢复算法见第 2.5 节). 而 m 层信息恢复需要同时获得各层的边信息, 故嵌入时产生的 m 层边信息需由两步嵌入法全部隐藏到第 m 层“区域一”的像素 LSBs 中, 以保证接收端一次性完整获取

边信息, 而不能将边信息分别嵌入至每层.

2.3 溢出控制

当使用基于差值域的直方图平移算法时, 所生成水印图像的部分像素可能超出正常范围, 即产生溢出. 例如: 假定 8 bit 灰度图像中存在灰度值分别为“0”和“1”的相邻像素, 如果以像素“1”预测像素“0”, 即可获得预测误差“-1”. 在误差“-1”中嵌入水印, “-1”可能变化为“-2”, 此时, 利用预测像素“1”恢复的含水印像素灰度为“-1”, 不在 $[0, 255]$ 内, 产生溢出.

一般地, 溢出现象只会发生在灰度值接近 0 和 255 的像素上. 考虑到每次直方图平移引起的差值改变最大为“1”, 经过 m 层直方图平移, 像素灰度累计改变量不超过 m , 故只有灰度位于 $[0, m-1]$ 和 $[255-m+1, 255]$ 的像素可能产生溢出. 本文采用简单的直方图收缩技术处理溢出. 如图 5 所示, 在进行直方图平移之前, 对位于 $[0, m-1]$ 和 $[255-m+1, 255]$ 的像素分别进行加 m 和减 m 操作, 使得处理后有关像素灰度分别位于区间 $[m, 2m-1]$ 和 $[255-2m+1, 255-m]$ 中. 经溢出处理后, 可保证对载体的平移操作不发生像素溢出. 注意到直方图收缩处理会使灰度在 $[m, 2m-1]$ 和 $[255-2m+1, 255-m]$ 间的像素发生重叠, 为区分重叠区像素的来源, 可进一步使用一个与载体图像同尺寸的 Bitmap 标记收缩像素的位置. 当像素发生收缩变化时, 位图标记为“1”; 反之标记为“0”. 对于自然图像而言, 当 m 取值较小时, 位于灰度 $[0, m-1]$ 和 $[255-m+1, 255]$ 间的像素较少, 此时, 位图中“0”和“1”的分布有显著差别, 故可对生成的 Bitmap 作深度无损压缩.

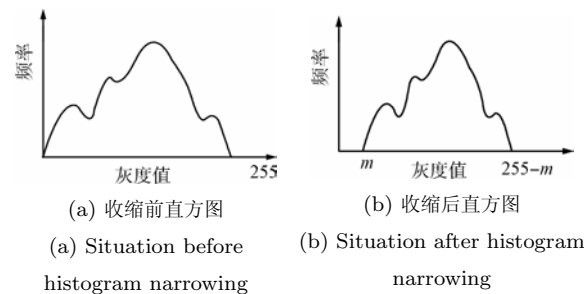


图 5 直方图收缩示意图

Fig. 5 The illustration of histogram narrowing technique

2.4 基于直方图平移的多层盲水印嵌入算法

根据前述的同步嵌入机制和溢出控制方法, 本节给出完整的基于差值域直方图平移的多层盲可逆水印算法. 由于在每层嵌入时可以选择最优的峰值点和零点, 比较现有的其他盲可逆水印算法, 本文的算法可以获得较好的性能. 参考图 6, 嵌入算法描述

如下:

步骤 1. 估计嵌入层数 m : 按照图 7 所示“倒 S 型扫描顺序”将图像 I 展开成一维序列 $\{I(i)|1 \leq i \leq size, i \in Z\}$, 根据式 (5) 生成相应差值域序列, 其中 $size$ 表示载体图像大小. 根据所生成差值域图像的直方图和水印信息大小, 由式 (1) 估计嵌入层数 m .

$$D(i) = |I(i) - I(i+1)|, \quad 1 \leq i < size \quad (5)$$

步骤 2. 直方图收缩: 根据估计嵌入层数 m , 对图像 I 按式 (6) 进行直方图收缩生成图像 I' 以避免水印图像溢出, 并产生一个与 I' 同尺寸的位图 Bitmap 以标记收缩像素的位置.

$$I'(i) = \begin{cases} I(i) + m, & I(i) \in [0, m-1] \\ I(i) - m, & I(i) \in [255 - m + 1, 255], \quad 1 \leq i \leq size \\ I(i), & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

步骤 3. 位图压缩: 采用行程编码 (Run-length encoding, RLE) 对生成的 Bitmap 进行无损压缩, 将压缩位图长度信息和压缩位图内容放在其他水印信息前, 并作为新水印一起嵌入到图像中.

步骤 4. 差值域生成及嵌入层数估计: 对收缩处理后的图像 I' , 重复步骤 1 和步骤 2, 生成新的差值序列 $D'(i)$, 并按下述步骤将含位图信息的新水印嵌入至 $D'(i)$.

步骤 5. 嵌入和水印图像生成: 当 $m = 1$ 时, 使用单层嵌入, 根据第 2.1 节的“两步嵌入法”对差值图像进行区域分块并对各区域块中的 $D'(i)$ 实施水印嵌入并生成含水印差值 $D''(i)$; 当 $m > 1$ 时, 使用多层嵌入, 根据第 2.2 节的“式嵌入法”对 $D'(i)$ 实现嵌入并生成 $D''(i)$. 对于第 k 层嵌入, 假定其峰值点和零点分别为 P_k 和 Z_k , 1 bit 水印为 w , 第 k 层嵌入前的差值记为 $D'(i)_{(k-1)}$, 第 k 层嵌入后的差值为 $D'(i)_k$, 则基于直方图平移的第 k 层嵌入如式 (7) 所示, 其中, 令 $D'(i)_0 = D'(i)$, $D''(i) = D'(i)_m$.

$$D'(i)_k = \begin{cases} D'(i)_{(k-1)} + 1, & P_k < Z_k, D'(i)_{(k-1)} \in (P_k, Z_k) \\ D'(i)_{(k-1)} + w, & P_k < Z_k, D'(i)_{(k-1)} = P_k \\ D'(i)_{(k-1)} - 1, & P_k > Z_k, D'(i)_{(k-1)} \in (Z_k, P_k) \\ D'(i)_{(k-1)} - w, & P_k > Z_k, D'(i)_{(k-1)} = P_k \\ D'(i)_{(k-1)}, & \text{其他} \end{cases} \quad 1 \leq i < size, 1 \leq k \leq m \quad (7)$$

按式 (8) 根据水印差值 $D''(i)$ 生成水印图像 S

$$S(i) = \begin{cases} I'(i+1) - D''(i), & I'(i) < I'(i+1), i < size \\ I'(i+1) + D''(i), & I'(i) \geq I'(i+1), i < size \\ I'(i), & i = size \end{cases} \quad (8)$$

为保证经过平移后的水印差值不小于零, 本步骤中的每层嵌入需要保证所选择的零点不小于零, 这样使得在水印提取过程中可由式 (9) 无失真生成含水印差值.

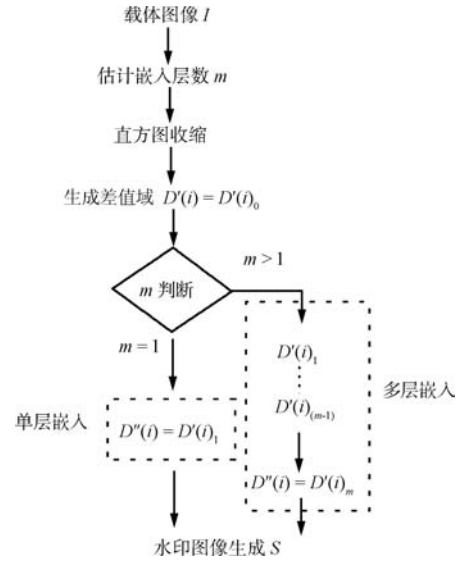


图 6 嵌入算法流程图

Fig. 6 The flow chart of embedding process

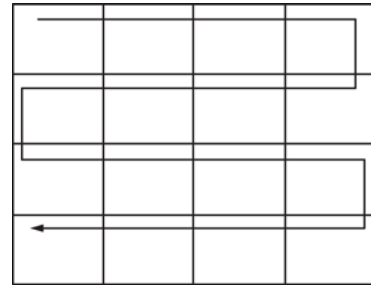


图 7 图像扫描顺序示意图

Fig. 7 The illustration of image scanning order

2.5 可逆水印提取和载体恢复

水印提取和载体恢复是嵌入过程的逆过程, 其算法具体描述如下:

步骤 1. 边信息的提取: 将图像按与发送端相同的方式作区域划分. 然后根据密钥确定水印图像“区域一”中替换像素的位置, 并由有关像素的 LSB 提取前 m 层的边信息 P_k 和 Z_k , 其中 $1 \leq k \leq m$.

步骤 2. 区域划分: 将水印图像划分为与嵌入过程一致的两个区域, 以 S_n, D_n, I_n, I'_n 和 $size_n$, 其中, $n = 1, 2$, 分别表示对应“区域一”和“区域二”的水印、差值、原始、直方图收缩图像和图像大小. 转步骤 3, 对“区域二”水印图像 S_2 水印提取和载体恢复.

步骤 3. “区域二”的 m 层水印提取和迭代恢复: 按照与嵌入过程相反的顺序, 即图 7 的逆顺序, 对 S_2 作 m 层水印提取和恢复, 得 I'_2 . 需要指出的是: 恢复 $S_2(i)$ 需要 $D'_2(i)$, 而由式 (8) 和式 (9), 计算第 m 层差值 $D'_2(i)$, 需恢复 $I'_2(i+1)$; 故需采用逐像素 m 层水印提取和恢复, 而不是逐层水印提取恢复, 具体过程分解如下:

步骤 3.1. 初始化: 设 $i = size_2$, 有 $I'_2(i) = S_2(i)$, 即各区域最后一个像素在水印嵌入过程中保持不变, 同时令 $i = size_2 - 1$.

步骤 3.2. 差值生成: 给定水印像素 $S_2(i)$ 和已恢复 $I'_2(i+1)$, 由式 (9) 生成当前水印像素的差值 $D'_2(i)$.

$$D'_2(i) = |S_2(i) - I'_2(i+1)| \quad (9)$$

步骤 3.3. 水印提取和差值恢复: 由嵌入过程, $D'_2(i)_m = D'_2(i)$, 作 m 次直方图平移提取和差值恢复, 生成 $D'_2(i)_0$. 根据恢复的 $D'_2(i)_k$ 和边信息 P_k, Z_k , 由式 (10) 可得第 k 层在该差值中嵌入的水印 $w_2(i)_k$, 由式 (11) 可进一步恢复上一层相关差值 $D'_2(i)_{(k-1)}$:

$$w_2(i)_k = \begin{cases} 1, & D'_2(i)_k = P_k + 1, P_k < Z_k \\ 1, & D'_2(i)_k = P_k - 1, P_k > Z_k, 1 \leq k \leq m \\ 0, & D'_2(i)_k = P_k \end{cases} \quad (10)$$

$$D'_2(i)_{(k-1)} = \begin{cases} D'_2(i)_k - 1, & D'_2(i)_k \in (P_k, Z_k), P_k < Z_k \\ D'_2(i)_k + 1, & D'_2(i)_k \in (Z_k, P_k), P_k > Z_k' \end{cases} \quad 1 \leq k \leq m \quad (11)$$

步骤 3.4. 图像 $I'_2(i)$ 的恢复: 由嵌入过程可知, $D'_2(i) = D'_2(i)_0$ 为不含水印差值. 根据 $D'_2(i)$ 和已恢复的 $I'_2(i+1)$ 可由式 (12) 恢复当前像素 $I'_2(i)$.

$$I'_2(i) = \begin{cases} I'_2(i+1) + D'_2(i), & S_2(i) \geq I'_2(i+1) \\ I'_2(i+1) - D'_2(i), & S_2(i) < I'_2(i+1) \end{cases} \quad i \geq 1 \quad (12)$$

步骤 3.5. 令 $i = i - 1$, 循环执行步骤 3.2~3.5, 直至恢复“区域二”中全部像素.

步骤 4. “区域一”的 m 层迭代恢复和水印提取: 由“区域二”第 m 层提取的水印 w_{2m} 中得到“区域一”替换像素的 LSB 信息, 恢复“区域一”水印图像 S_1 , 其中 $w_{2m} = \{w_2(i)_k | k = m, 1 < i < size_2\}$. 仿照步骤 3.2~3.5 对 S_1 作水印提取和像素恢复, 生成恢复图像 I'_1 和水印信号 w_1 . 分别结合 I'_1, I'_2 和 w_1, w_2 得到完整的恢复图像 I' 水印信号 w .

步骤 5. 位图的提取和恢复: 从水印的头部提取压缩位图的长度, 并据此提取和解压缩位图.

步骤 6. 直方图收缩的恢复: 根据从水印信号 w 中提取的直方图收缩位图, 对 I' 进行直方图收缩逆变换, 得到无失真原始图像 I .

3 实验结果和分析

为分析和评估算法性能, 本节给出了本文算法和近期文献中报道的两个典型盲可逆水印算法^[19-20] 以及一个高性能差值扩展 (Difference expansion, DE) 算法^[23] 的性能比较, 有关算法都是基于直方图平移技术. 实验中, 选择 6 幅具有典型纹理特征的 512 像素 \times 512 像素 \times 8 bit 测试图像, 包括 Lena, Pepper, Baboon, Boat, Goldhill 和 F16, 图 8 为采用本文算法生成的相应水印图像, 并给出了相关性能, 例如: 嵌入层数 m 、PSNR 和嵌入容量. 实验中采用行程编码 (RLE) 作位图无损压缩, 并以峰值信噪比 (Peak signal to noise ratio, PSNR)/容量曲线客观比较有关算法的性能. 考虑到实际应用中对水印图像质量要求较高, 实验中只研究 PSNR $>$ 38 的部分.

表 1 给出了各测试图像压缩位图尺寸随嵌入层数增加而变化的情况. 不难发现: 虽然压缩位图会消耗部分嵌入容量, 但其尺寸较总嵌入容量一般可以忽略不计.

表 1 压缩位图的大小 (比特)

Table 1 Sizes of the compressed bitmaps (bit)

测试图像	嵌入层数 m				
	1	2	3	4	5
512 \times 512					
Lena	20	20	20	20	20
Peppers	100	240	740	2160	4380
Baboon	1120	1760	2480	3080	3520
Boat	200	480	800	1320	2980
Goldhill	20	20	20	20	20
F16	20	20	20	20	20

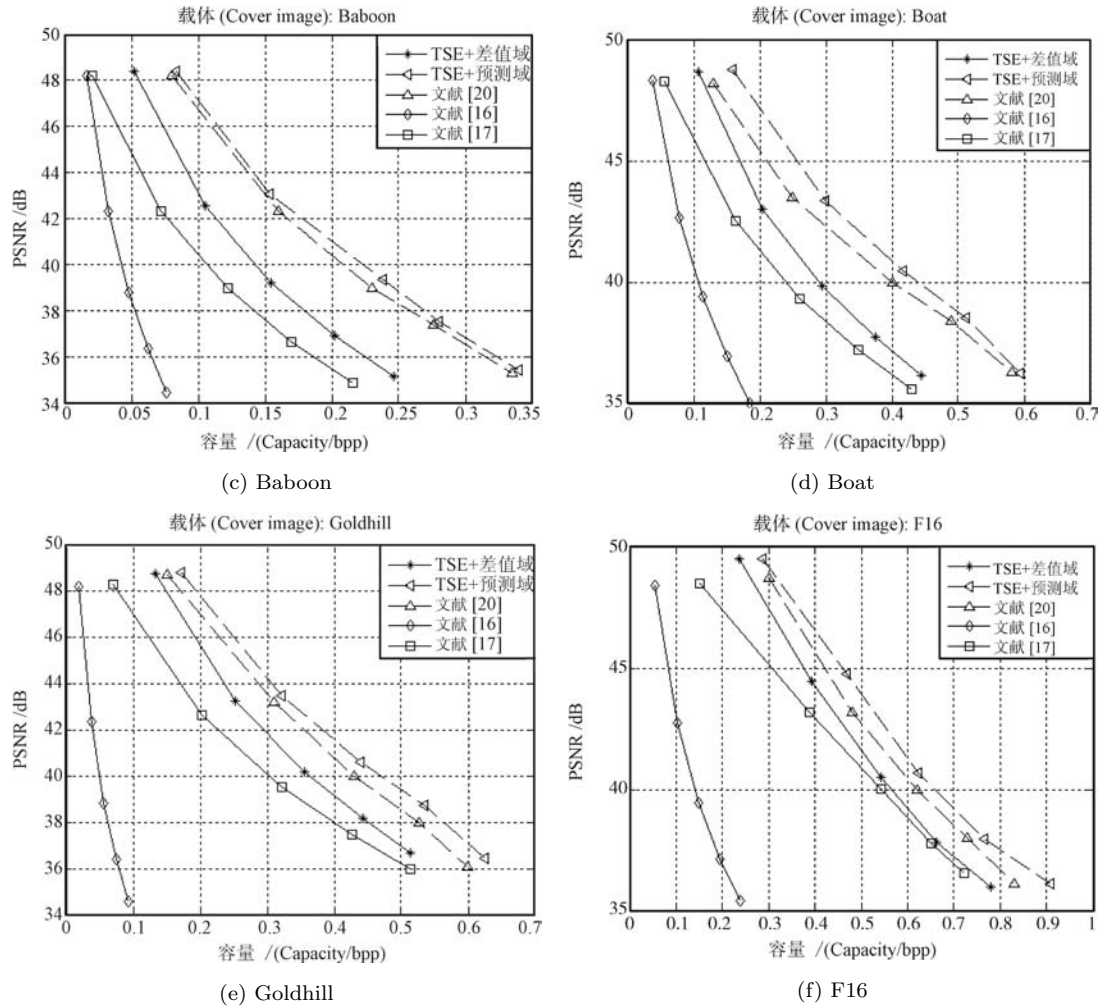


图9 本文算法和其他同类算法的性能比较

Fig.9 Comparison of our scheme and others

4 结论

本文提出了一种基于多层嵌入的直方图平移盲可逆水印方法. 该方法的水印同步机制允许在每层直方图平移嵌入时选择最优的峰值/零点对, 从而保证算法的高性能. 对于单层嵌入, 本文提出了一种两步嵌入法框架, 该框架在保证选择最优峰值/零点的同时将有关边信息嵌入到水印图像本身以实现盲提取. 对于较大容量水印, 本文采用多层嵌入, 并进一步配合使用链式嵌入法实现盲水印检测. 实验仿真结果表明: 比较目前同类盲可逆水印算法, 本文提出的方法不但可以实现盲水印, 而且在性能上有显著改善.

References

- 1 Cox I J, Miller M L, Bloom J A. *Digital Watermarking*. San Francisco: Morgan Kaufmann, 2001
- 2 Wang Xiang-Yang, Hou Li-Min, Wu Jun. Feature-based digital image watermarking scheme robust to geometric attacks. *Acta Automatica Sinica*, 2008, **34**(1): 1–6 (王向阳, 侯丽敏, 邬俊. 基于图像特征点的强鲁棒数字水印嵌入方案. *自动化学报*, 2008, **34**(1): 1–6)
- 3 Xu Zi-Han, Wang Xiang-Yang. An SVR based image watermarking detection algorithm against geometric attacks. *Acta Automatica Sinica*, 2009, **35**(1): 23–27 (徐紫涵, 王向阳. 可有效抵抗一般性几何攻击的数字水印检测方法. *自动化学报*, 2009, **35**(1): 23–27)
- 4 Deng Cheng, Li Jie, Gao Xin-Bo. Geometric attacks resistant image watermarking in affine covariant regions. *Acta Automatica Sinica*, 2010, **36**(2): 221–228 (邓成, 李洁, 高新波. 基于仿射协变区域的抗几何攻击图像水印算法. *自动化学报*, 2010, **36**(2): 221–228)
- 5 Barton J M. Method and Apparatus for Embedding Authentication Information within Digital Data. U.S. Patent 5646997, July 1997
- 6 Fridrich J, Goljan M, Du R. Invertible authentication. In: *Proceedings of the SPIE Security and Watermarking of Multimedia Contents*. San Jose, USA: SPIE, 2001. 197–208
- 7 Celik M U, Sharma G, Tekalp A M, Saber E. Lossless generalized-LSB data embedding. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2005, **14**(2): 253–266

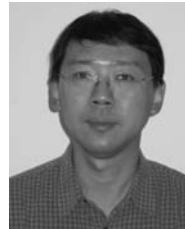
- 8 Tian J. Reversible data embedding using a difference expansion. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2003, **13**(8): 890–896
- 9 Alattar A M. Reversible watermark using the difference expansion of a generalized integer transform. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, **13**(8): 1147–1156
- 10 Thodi D M, Rodriguez J J. Prediction-error-based reversible watermarking. In: *Proceedings of the International Conference on Image Processing*. Singapore, Singapore: IEEE, 2004. 1549–1552
- 11 Thodi D M, Rodriguez J J. Expansion embedding techniques for reversible watermarking. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2007, **16**(3): 721–730
- 12 Weng S W, Zhao Y, Pan J S, Ni R R. Reversible watermarking based on invariability and adjustment on pixel pairs. *IEEE Signal Processing Letters*, 2008, **15**: 721–724
- 13 Weng S W, Zhao Y, Ni R R, Pan J S. Parity-invariability-based reversible watermarking. *Electronics Letters*, 2009, **45**(20): 1022–1023
- 14 Ni Z C, Shi Y Q, Ansari N, Su W. Reversible data hiding. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2006, **16**(3): 354–362
- 15 Xuan G, Yao Q, Yang C, Gao J, Chai P, Shi Y Q, Ni Z C. Lossless data hiding using histogram shifting method based on integer wavelets. In: *Proceedings of the International Workshop on Digital Watermarking*. Jeju Island, Korea: Springer, 2006. 323–332
- 16 Wu X Y. Reversible semi-fragile watermarking based on histogram shifting of integer wavelet coefficients. In: *Proceedings of the Digital Ecosystems and Technologies Conference*. Cairns, Australia: IEEE, 2007. 501–505
- 17 Lin C C, Tai W L, Chang C C. Multilevel reversible data hiding based on histogram modification of difference images. *Pattern Recognition*, 2008, **41**(12): 3582–3591
- 18 Tsai P, Hu Y C, Yeh H L. Reversible image hiding scheme using predictive coding and histogram shifting. *Signal Processing*, 2009, **89**(6): 1129–1143
- 19 Tai W L, Yeh C M, Chang C C. Reversible data hiding based on histogram modification of pixel differences. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2009, **19**(6): 906–910
- 20 Hwang J, Kim J, Choi J. A reversible watermarking based on histogram shifting. In: *Proceedings of the International Workshop on Digital Watermarking*. Jeju Island, Korea: Springer, 2006. 348–361
- 21 Yang B, Schmucker M, Busch C, Niu X, Sun S. Approaching optimal value expansion for reversible watermarking. In: *Proceedings of the 7th Workshops on Multimedia and Security*. New York, USA: ACM, 2005. 95–102
- 22 Wang J X, Ni J Q. A fast performance estimation scheme for histogram shifting based multi-layer embedding. In: *Proceedings of the 17th IEEE International Conference on Image Processing*. Hong Kong, China: IEEE, 2010. 3701–3704
- 23 Luo L, Chen Z, Chen M, Zeng X, Xiong Z. Reversible image watermarking using interpolation technique. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2010, **5**(1): 187–193



王俊祥 景德镇陶瓷学院机电学院讲师, 中山大学博士研究生。2006 年和 2008 年分别于哈尔滨工程大学与哈尔滨工业大学获得学士和硕士学位。主要研究方向为信息隐藏, 多媒体信号处理。

E-mail: wjx851113851113@yahoo.cn

(**WANG Jun-Xiang** Lecturer at the School of Mechanical and Electronic Engineering, Jingdezhen Ceramic Institute (JCI) and Ph.D. candidate at Sun Yat-sen University. He received his bachelor and master degrees from Harbin Engineering University and Harbin Institute of Technology in 2006 and 2008, respectively. His research interest covers information security and multimedia signal processing.)



倪江群 中山大学信息科学与技术学院教授。1998 年于香港大学获得博士学位, 主要研究方向为多媒体信号处理和通信, 多媒体信息隐藏和取证, 数字电视关键技术, 嵌入式系统及应用。本文通信作者。E-mail: issjqni@mail.sysu.edu.cn

(**NI Jiang-Qun** Professor at the School of Information Science and

Technology, Sun Yat-sen University. He received his Ph. D. degree from University of Hong Kong in 1998. His research interest covers multimedia signal processing and communication, information hiding and forensics, key technology of digital television, and embedded system and applications. Corresponding author of this paper.)



潘金伟 中山大学信息与科学技术学院硕士研究生。2009 年于中山大学信息与科学技术学院获得学士学位。主要研究方向为数字水印, 信息隐藏。

E-mail: panjinweisysu@gmail.com

(**PAN Jin-Wei** Master student at the School of Information Science and Technology, Sun Yat-sen University. He

received his bachelor degree from Sun Yat-sen University in 2009. His research interest covers digital watermarking and information hiding.)