

直方图 2Bin 多进制图像数字水印算法的研究

岳 桢¹, 李子臣^{2*}, 杨义先¹, 游福成², 刘福平²

(1. 北京邮电大学信息安全中心, 北京 100876; 2. 北京印刷学院信息工程学院, 北京 102600)

摘 要: 具有低失真、强鲁棒等特点的直方图数字水印算法, 一直是信息隐藏领域研究的热点. 本文在分析现有直方图数字水印算法的基础上, 提出并设计了基于直方图修改的 2Bin 多进制图像水印算法. 以三进制为例, 设计实现了 2Bin 三进制图像数字水印算法. 在设计的算法中, 根据嵌入的水印信息容量和载体图像的大小调整算法嵌入阈值, 在维持直方图相邻 2Bin 高低形状不变的情况下, 确定修改像素数目以及分块策略, 实现水印信息的嵌入和提取操作. 实验结果表明, 该方法能够智能均衡载体图像质量和水印容量, 同现有算法相比, 大大提高了水印嵌入容量和水印嵌入后的图像质量, 且能抵抗裁剪、旋转等传统的几何攻击和信号处理攻击.

关键词: 数字水印; 直方图修改; 相邻 2Bin; 水印容量

中图分类号: TP3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2020)03-0531-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2020.03.016

A Histogram-Based 2Bin M-ary Image Digital Watermarking Algorithm

YUE Zhen¹, LI Zi-chen^{2*}, YANG Yi-xian¹, YOU Fu-cheng², LIU Fu-ping²

(1. Information Security Center, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;

2. School of Information Engineering, Beijing Institute of Graphic Communication, Beijing 102600, China)

Abstract: The histogram shape-based digital watermarking, which has the characteristics of low distortion, strong robustness, and etc, has become a hot topic in information hiding fields. Upon the basic properties of the existing histogram shape-based digital watermarking, a modified histogram shape-based 2Bin M-ary digital watermarking algorithm is designed firstly, and then, a concrete ternary digital watermarking as an example of the M-ary system is further implemented. In the designed algorithm, the embedding threshold is adjusted according to the embedded watermark information capacity and the size of the carrier image. Under the condition of maintaining the high or low shape of the adjacent 2Bin histogram unchanged, the modified pixel number and the block strategy are determined to realize the embedding and extraction of watermark information. Experimental results show that this method is able to balance the relationship between image quality and watermark capacity intelligently, and that it greatly improves embedding capacity and image quality compared to these existing algorithms, meanwhile equips with the ability to resist the traditional geometric attacks and common image processing operations.

Key words: watermarking; histogram modification; adjacent 2Bin; large capacity

1 引言

数字水印技术作为信息隐藏的一个重要分支, 为数字多媒体版权保护提供了一个崭新方法, 并得到学者的广泛研究和应用^[1]. 直方图水印技术因其在水印嵌入过程中具有像素值的修改不受像素位置影响这一显著优势, 近年来成为数字水印研究的新兴方向.

直方图水印技术分为基于直方图平移和直方图修改的相关水印技术, 后者指对原始宿主图像的直方图

进行直接修改. 直方图平移水印技术主要集中于可逆数字水印和密文域数字水印研究. 在可逆水印方面, 研究者们结合不同的领域设计了很多具有代表性的可逆水印算法, 例如量化后的离散余弦变换系数^[2], 秘密分享机制^[3], 人眼视觉特征对不同区域的敏感程度^[4], 预测误差与阈值的平衡关系^[5], 矢量地图的特性^[6], 不同阈值策略^[7]等. 在密文域方面, 文献[8]对加密后的载体图像利用二维差分直方图平移进行信息嵌入. 而文献[9]利用同态加密的优势实现了较大容量的可逆水

收稿日期: 2019-04-17; 修回日期: 2019-06-25; 责任编辑: 梅志强

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61370188); 北京市教委科研计划一般项目(No. KM201610015002, No. KM201510015009); 北京市教委科研计划重点项目(No. KZ201510015015, No. KZ201710015010); 科技创新服务能力建设-科研水平提高定额项目(No. PXM2017_014223_000063)

印嵌入. 为了使水印算法具有更广泛的应用, 文献[10]在加密后的 JPEG 比特流上进行信息嵌入, 该算法在保证正确提取秘密信息的同时实现了完美的载体图像恢复. 在基于直方图修改水印方面, 文献[11]对原始载体图像进行高斯低通滤波生成低频图像后提取相应低频图像的直方图, 通过调整相邻 2Bin 的高度来嵌入水印信息; 该算法首次在宿主图像的直方图上进行直接修改来嵌入水印信息, 并通过实验证实了水印鲁棒性, 但缺点是嵌入容量较低. 文献[12~14]在文献[11]方法的基础上引进基于聚类的特征选择机制在连续 3Bin 上进行水印信息嵌入, 从而有效消除像素点数目为零或很少的 Bin. 文献[15]在文献[11, 12]的基础上改进了像素修改位置, 使所设计的水印能有效抵抗几何畸变攻击, 在一定程度上提高了水印鲁棒性. 文献[16~20]对基于直方图修改的鲁棒水印方法进行了深入扩展. 虽然以上算法或提高了水印鲁棒性或解决了原始算法设计中的缺陷, 然而所嵌入的水印容量没有明显提高. 如何在原有图像视觉质量和鲁棒性的基础上进一步提高嵌入容量, 一直是直方图数字水印研究的热点.

本文针对直方图修改水印技术的嵌入容量不足问题, 通过分析相邻 2Bin 嵌入关系, 在现有嵌入区间选择和分块策略的基础上, 设计了基于直方图修改的 2Bin 多进制图像水印算法. 以 $\{0, 1, 2\}$ 三进制为例, 设计了一种 2Bin 三进制图像数字水印算法. 在预处理阶段, 通过预定义的两个阈值选择合适嵌入区间. 在嵌入阶段, 根据水印信息, 确定嵌入阈值, 在维持原始直方图相邻 2Bin 高低形状不变的情况下调整相邻 2Bin 的像素数目, 使前后 2Bin 满足一定的比例关系. 在水印提取阶段, 通过相邻 2Bin 满足的比例关系直接进行水印的盲提取. 实验结果表明, 该算法不仅具有良好的峰值信噪比 (Peak Signal-to-Noise Ratio, PSNR) 和较大的水印信息嵌入能力, 而且能抵抗一定条件的传统几何攻击和常见图像处理攻击.

2 传统直方图修改水印算法

原始直方图水印算法主要利用直方图形状和图像均值进行水印的嵌入和提取操作. 在水印嵌入过程中, 通过图像均值 $\bar{A}$ 确定直方图统计区间 $B = [(1 - \lambda)\bar{A}, (1 + \lambda)\bar{A}]$, 并将该区间内的每 G 个灰度级组成一个 Bin, 一般情况 $G = 1$ 或 $G = 2$, 每相邻 2Bin 组成一组. 按照嵌入规则, 根据组内 2Bin 所含像素数目关系嵌入 1 比特水印信息. 该算法在同一 Bin 组下进行像素值的随机修改, 达到调整相邻灰度级高度的目的.

假设相邻 2Bin 所含像素数目分别为 a 和 b , 则嵌入规则如下:

$$\begin{cases} \frac{a}{b} \geq T, & W = 1 \\ \frac{b}{a} \geq T, & W = 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中, 阈值 T 用来控制像素修改数目, 从而平衡图像质量和鲁棒性.

在水印提取阶段, 计算图像均值并获取直方图, 确定统计区间并两两分组, 根据相邻 2Bin 所含像素数目关系对每组提取 1 比特水印信息, 具体规则如下:

$$W' = \begin{cases} 1, & \frac{a'}{b'} \geq T \\ 0, & \frac{b'}{a'} \geq T \end{cases} \quad (2)$$

其中, a' 和 b' 是含水印图像前后 2Bin 所含像素数目.

由上述水印的嵌入和提取算法可知, 传统直方图水印算法每相邻 2Bin 只能嵌入 1 比特信息, 嵌入容量相对较低. 同时, 由于没有考虑原始直方图相邻 2Bin 的高低情况, 只是单纯根据嵌入水印信息直接修改相邻 2Bin 大小关系, 影响了图像视觉质量.

3 2Bin 多进制水印算法的原理与分析

本节提出了基于直方图修改的 2Bin 多进制水印算法概念, 设计了 2Bin 多进制水印的嵌入和提取算法.

3.1 2Bin 多进制水印算法的概念

定义 1 (2Bin 二进制水印算法) 在基于直方图修改的数字水印算法中, 水印信息编码为 $\{0, 1\}$ 二进制序列, 设置 2 个阈值, 通过修改直方图中相邻 2Bin 像素值嵌入水印信息, 再根据相邻 2Bin 所含像素数目大小关系提取水印, 这样的数字水印算法称为 2Bin 二进制水印算法.

传统基于直方图修改的水印算法一般都是 2Bin 二进制水印算法. 为了增强水印的鲁棒性, 也有在 3Bin 中隐藏 $\{0, 1\}$ 二进制序列水印信息, 称为 3Bin 二进制水印算法.

定义 2 (2Bin 多进制水印算法) 在基于直方图的数字水印算法中, 水印信息编码为 $\{0, 1, \dots, (r-1)\}$ 的 r 进制序列, 设置 r 个阈值, 通过修改直方图中相邻 2Bin 像素值嵌入 r 进制的水印信息, 再根据相邻 2Bin 所含像素数目各种大小关系提取 r 进制水印信息, 这样的算法称为 2Bin 多进制数字水印算法.

若 $r = 3$, 那么就称为 2Bin 三进制, 是 2Bin 多进制的特例. 水印信息编码为 $\{0, 1, 2\}$ 三进制序列, 设置 3 个阈值. 在维持原始直方图大小关系的前提下, 根据待嵌入信息及对应阈值, 确定像素修改数目, 完成三进制水印信息嵌入; 在提取阶段, 根据相邻 2Bin 的像素数目关系提取水印信息.

3.2 2Bin 多进制水印嵌入算法

假设待嵌入水印信息为 $W = w_1 w_2 \dots w_L, i \in \{1, 2, \dots, L\}, w_i \in \{0, 1, \dots, (r-1)\}$, 每相邻 2Bin 组成一组.

设 Bin1 像素数目为 a , Bin2 像素数目为 b , 不同待嵌入水印信息的修改规则如表 1 所示.

表 1 2Bin 多进制水印嵌入算法

原始 Bin1 和 Bin2 大小关系	水印信息 w_i	阈值 T	像素修改量	水印嵌入后 Bin1 和 Bin2 像素数目情况
$a \geq b$	0	T_1	$\Delta_{b \rightarrow a} = \lceil \frac{T \times b - a}{1 + T} \rceil$	$a' = a + \lceil \frac{T \times b - a}{1 + T} \rceil$ $b' = b - \lceil \frac{T \times b - a}{1 + T} \rceil$
	1	T_2		
	$\vdots$	$\vdots$		
	$(r-1)$	T_r		
$a < b$	0	T_1	$\Delta_{a \rightarrow b} = \lceil \frac{T \times a - b}{1 + T} \rceil$	$a' = a - \lceil \frac{T \times a - b}{1 + T} \rceil$ $b' = b + \lceil \frac{T \times a - b}{1 + T} \rceil$
	1	T_2		
	$\vdots$	$\vdots$		
	$(r-1)$	T_r		

由表 1 判断并修改原始 Bin1 和 Bin2 的大小关系. 如果 $a \geq b$, 根据待嵌水印信息所对应的阈值 T 计算相应修改量 $\Delta_{b \rightarrow a} = \lceil (T \times b - a) / (1 + T) \rceil$, 从 Bin2 中按照预设规则选择 $\Delta_{b \rightarrow a}$ 个像素值进行操作, 完成水印嵌入; 如果 $a < b$, 根据待嵌水印所对应的阈值 T 计算相应修改量 $\Delta_{a \rightarrow b} = \lceil (T \times a - b) / (1 + T) \rceil$, 从 Bin1 中选择 $\Delta_{a \rightarrow b}$ 个像素值移动到 Bin2, 完成水印嵌入.

水印嵌入后的 Bin 组大小关系如图 1 所示.

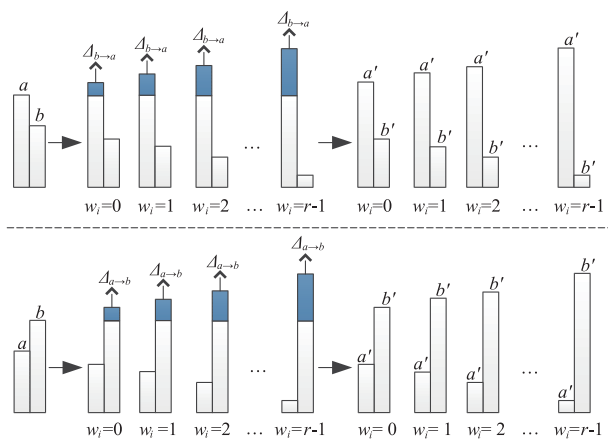


图 1 水印嵌入后 Bin 组大小关系图

在水印嵌入过程中, 假设相邻 2Bin 像素数目分别为 a 和 b , 根据水印信息修改相邻 2Bin 的比例关系. 具体来说, 如果 $a \geq b$, 修改后 a' 仍大于等于 b' ; 若 $a < b$, 修改后 a' 仍小于 b' , 这样保证了相邻 2Bin 的大小关系不变, 从而提升了嵌入水印后的载体图像质量.

3.3 2Bin 多进制水印提取算法

对所接收的含水印图像生成 Bin 组, 按照表 2 规则提取水印信息. 其中, 待提取的 Bin1 和 Bin2 像素数目分别为 a' 和 b' , 提取的水印信息为 w'_i .

表 2 2Bin 多进制水印提取算法

Bin1 和 Bin2 大小关系	阈值 T	提取的水印信息 w'_i
$a' \geq b' \quad \& \quad \lfloor a'/b' \rfloor = T$	$T \leq T_1$	0
	$T_1 < T \leq T_2$	1
	$\vdots$	$\vdots$
	$T_{r-1} < T \leq T_r$	$(r-1)$
$a' < b' \quad \& \quad \lfloor b'/a' \rfloor = T$	$T \leq T_1$	0
	$T_1 < T \leq T_2$	1
	$\vdots$	$\vdots$
	$T_{r-1} < T \leq T_r$	$(r-1)$

上述所提 2Bin 多进制水印信息为 $\{0, 1, \dots, (r-1)\}$ 的 r 进制, 每相邻 2Bin 可嵌入 $\log_2(r)$ 比特信息; 与传统算法相比, 在相同 Bin 组数目下, 水印嵌入容量是原有算法的 $\log_2(r)$ 倍, 大大提高了水印的嵌入容量. 当水印信息是二进制时, 本文算法与传统算法不同, 虽然嵌入容量相同, 但由于所提算法维持原始直方图相邻 2Bin 大小关系恒定, 水印图像质量显著提高.

本节提出了基于直方图修改的 2Bin 多进制图像水印算法的定义, 并详细给出了 r 进制情况下的水印嵌入和提取算法. 为了更好地理解本文所提的 2Bin 多进制水印概念及水印嵌入和提取算法, 本文接下来将以 2Bin 三进制为例, 具体设计和实现了直方图 2Bin 三进制水印算法.

4 直方图 2Bin 三进制水印算法

本节所提的 2Bin 三进制水印算法包括: 嵌入区间选择、基于分块策略的像素位置修改、水印嵌入和提取以及实验结果分析.

4.1 嵌入区间选择

本文采用上下截取直方图嵌入区间进行水印嵌入和提取, 避免了 Bin 中含有极少或不含像素的情况. 直方图嵌入区间由截取阈值 Y_1 和 Y_2 决定, 如式 (3) 和 (4) 所示.

$$Y_1 = M \times N \times \alpha_1 \quad (3)$$

$$Y_2 = M \times N \times \alpha_2 \quad (4)$$

其中, M 和 N 分别表示图像高度和宽度, α_1 和 α_2 均在 $[0, 1]$ 范围内.

图 2 展示了本文所采用的直方图嵌入区间选择策略, 从图 2 可知, 只有 $[Y_1, Y_2]$ 的灰度级参与水印的嵌入和提取操作.

此外, 本文进一步分析了参数 Y_1 和 Y_2 , 其决定了嵌入阈值范围 $T < \lfloor Y_1/Y_2 \rfloor$, 进而直接影响水印嵌入后图像的 PSNR 以及嵌入容量. 图 3 表示水印嵌入后的部分直方图示意图, x 轴表示灰度级 ($x \in [0, 255]$), y 轴表示灰度级的像素数目.

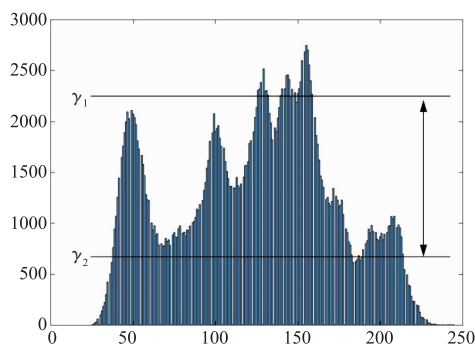


图2 嵌入区间选择方法示意图

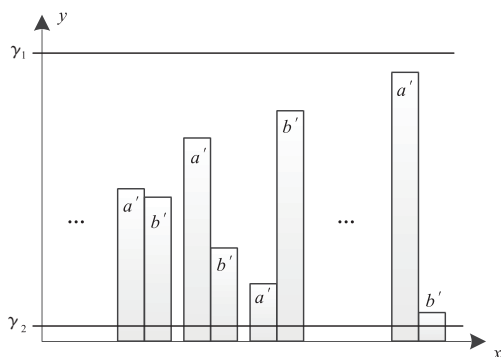


图3 水印嵌入后的部分直方图示意图

4.2 基于分块策略的像素位置修改

选用分块策略进行像素位置修改,解决了传统基于直方图修改的水印算法随机选择像素位置修改易造成已修改与周围未修改区域形成鲜明对比,从而不可避免导致最终水印图像的视觉失真问题。

该方法首先计算能反应任意子块平滑度的均方误差,按照从大到小顺序排序,优先选择均方差大的块,即非平滑区域块进行像素修改。假设载体图像 I 大小为 $M \times N$,所划分不重叠块的大小为 $n \times n$,分别计算每块的均值和均方误差,公式如下所示。

$$\text{mean}(p, q) = \frac{1}{n \times n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n I(i, j) \quad (5)$$

$$\text{MSE}(p, q) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (I(i, j) - \text{mean}(p, q))^2}{n \times n}} \quad (6)$$

其中, $\text{mean}(p, q)$ 和 $\text{MSE}(p, q)$ 分别表示图像块 (p, q) 的均值和均方误差,并且 p 和 q 分别满足 $p = 1, 2, \dots, M/n$ 和 $q = 1, 2, \dots, N/n$ 。

如何选择分块大小是分块策略相当重要的一步。分块太大将导致修改区域与未修改区域有明显差别,分块太小抗攻击能力较低。本文选用 8×8 分块大小,既能满足人眼视觉质量的要求,也能达到较好的鲁棒性。

4.3 水印嵌入与提取

4.3.1 水印嵌入

假设长度为 L 的三进制水印信息为 $W = \{w_1, w_2,$

$\dots, w_L\}$, 水印嵌入主要步骤如下:

步骤1:划分载体图像 I 为 $n \times n$ 大小不重叠块,计算每块的均方误差 $\text{MSE}(p, q)$ 并从大到小排序。

步骤2:生成载体图像直方图 H , 利用截取阈值 γ_1 和 γ_2 选择合适的嵌入区间 H_Y 。

步骤3:在选定的直方图嵌入区间 H_Y 中,提取待嵌入水印所需的 Bin 组,每2个灰度级组成一个 Bin。设相邻的 Bin1 和 Bin2 像素数目分别为 a 和 b , 水印嵌入规则如下:

① 当嵌入水印“0”时,嵌入阈值 T_1 置为 1.5。

若 $a \geq b$, 确定待修改的像素数目 $\Delta_{b \rightarrow a} = \lceil (3 \times b - 2 \times a) / 5 \rceil$, 按照步骤1已排序的分块次序,将 Bin2 的所有已选像素的值减2,即完成水印嵌入;若 $a < b$, 同上,从 Bin1 中选择 $\Delta_{a \rightarrow b} = \lceil (3 \times a - 2 \times b) / 5 \rceil$ 个像素值加2,完成水印嵌入。

② 当嵌入水印“1”时,嵌入阈值 T_2 置为 2.5。

若 $a \geq b$, 按照上述规则,从 Bin2 中选择 $\Delta_{b \rightarrow a} = \lceil (5 \times b - 2 \times a) / 7 \rceil$ 个像素值减2,完成水印嵌入;若 $a < b$, 同上,从 Bin1 中选择 $\Delta_{a \rightarrow b} = \lceil (5 \times a - 2 \times b) / 7 \rceil$ 个像素值加2,完成水印嵌入。

③ 当嵌入水印“2”时,嵌入阈值 T_3 置为 3.5。

若 $a \geq b$, 按照上述规则,从 Bin2 中选择 $\Delta_{b \rightarrow a} = \lceil (7 \times b - 2 \times a) / 9 \rceil$ 个像素值减2,完成水印嵌入;若 $a < b$, 同上,从 Bin1 中选择 $\Delta_{a \rightarrow b} = \lceil (7 \times a - 2 \times b) / 9 \rceil$ 个像素值加2,完成水印嵌入。

步骤4:重复上述步骤,直至所有水印信息嵌入到长度为 L 的 Bin 组中,获取水印嵌入后的图像 I_w 。

4.3.2 水印提取

在水印提取阶段,接收方事先知道参数 α_1, α_2 和提取阈值,提取过程具体如下。

步骤1:生成含水印图像 I_w 的直方图 H' , 利用与嵌入规则相同的直方图区间选择方法选择合适的水印提取区间 H'_Y 。

步骤2:对 H'_Y 进行 Bin 组划分,每相邻2个灰度级组成一个 Bin, 每相邻2Bin 组成一组。

步骤3:设 Bin1 和 Bin2 像素数目分别为 a' 和 b' , 根据它们的比例关系依次提取水印信息,规则如下:

① 如果 $a' \geq b'$ & $\lfloor a'/b' \rfloor = T$, 当 $T \leq 1.5$ 时, 水印提取信息为“0”; 当 $1.5 < T \leq 2.5$ 时, 水印提取信息为“1”; 当 $2.5 < T \leq 3.5$ 时, 提取水印信息为“2”。

② 如果 $a' < b'$ & $\lfloor b'/a' \rfloor = T$, 当 $T \leq 1.5$ 时, 水印提取信息为“0”; 当 $1.5 < T \leq 2.5$ 时, 水印提取信息为“1”; 当 $2.5 < T \leq 3.5$ 时, 提取水印信息为“2”。

步骤4:重复步骤3,从生成的 Bin 组中提取所有水印信息。

4.4 实验结果

本文在 3.20GHz 主频、英特尔酷睿 i5-6500 处理

器、8GB 运行内存的台式机上通过 MATLAB R2017a 进行实验. 选用最具有代表性和常用的标准图像系统测试水印的性能, 测试图像是大小为 512×512 的标准 8 位灰度图像^[21,22].

4.4.1 性能评价指标

(1) 嵌入容量

嵌入容量是指载体图像能够承受的最大嵌入信息量.

(2) 图像质量

水印嵌入后的图像质量用峰值信噪比 (PSNR) 和结构相似性 (Structural Similarity Index, SSIM) 衡量. PSNR 和 SSIM 定义如下:

$$\text{PSNR} = 10 \times \log_{10} \frac{255^2}{\text{MSE}} \quad (7)$$

$$\text{SSIM} = \frac{(2\mu_x\mu_y + C_1)(2\sigma_{xy} + C_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)} \quad (8)$$

其中, MSE 是原始载体图像和水印嵌入后图像之间的均方误差, 如式(6)所示. μ_x 和 μ_y 是载体图像和水印图像的均值, σ_x^2 和 σ_y^2 是载体图像和水印图像的方差, σ_{xy} 是载体图像和水印图像的协方差, C_1 和 C_2 是调控参数.

(3) 水印鲁棒性

本文分析了图像在中值滤波 (滑动窗口大小为 5×5), 椒盐噪声 (方差为 10), 加性高斯白噪声 (方差为

10), 旋转 ($10^\circ, 25^\circ$), 裁剪 (10%, 20%, 30%) 等攻击下的正确提取水印能力, 用比特错误率 (Bit Error Rate, BER) 指标衡量.

4.4.2 实验结果及分析

为了评估算法的嵌入容量, 本文与文献[11, 16, 17]在相同 Bin 数目 (假设 64) 下比较了嵌入容量, 结果如表 3 所示. 当水印编码为 $\{0, 1, 2\}$ 三进制时, 本文的嵌入容量是其他算法的 1.58 倍; 当水印编码为 r 进制时, 本文的嵌入容量比其他算法提高了 $\log_2(r)$ 倍. 因此, 本文所提算法极大提高了水印的嵌入容量.

表 3 本文算法与其他算法嵌入容量比较 (单位: 比特)

水印编码	本文方法	文献[11]	文献[16]	文献[17]
三进制	$32 \times \log_2 3$	32	32	32
r 进制	$32 \times \log_2(r)$	32	32	32

对于水印的不可感知性, 本文给出了不同嵌入容量下的 PSNR 和 SSIM 结果. 表 4 展示了测试图像 Baboon、Barbara、Lena 和 Peppers 的测试结果, 图 4 给出了 100 张图片的测试结果. 从表 4 可知, 随着嵌入容量的增加, 修改像素数也成比例的增加, 导致含水印图像的视觉质量有所下降. 由图 4 的 100 张测试图像结果可知, 本文算法得到的 PSNR 超过 40 分贝^[23], SSIM 高于 0.9^[24], 完全满足实际应用中水印图像的质量要求.

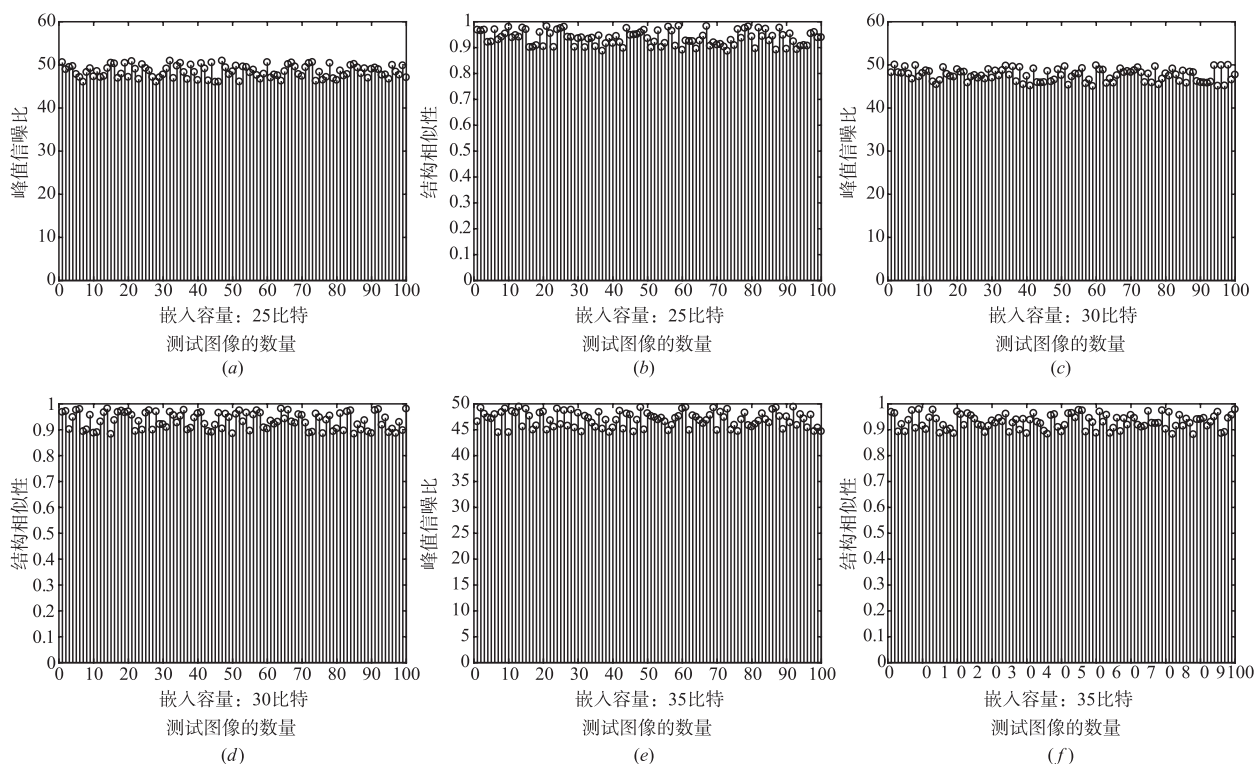


图4 不同嵌入容量下100张水印图像的PSNR和SSIM

表 4 不同嵌入容量下水印图像的 PSNR 和 SSIM

图片	图像质量	嵌入容量		
		25bit	30bit	35bit
Baboon	PSNR (dB)	50.89	49.99	49.40
	SSIM	0.9984	0.9980	0.9974
Barbara	PSNR (dB)	51.81	51.03	50.19
	SSIM	0.9937	0.9930	0.9897
Lena	PSNR (dB)	51.26	50.36	49.93
	SSIM	0.9880	0.9827	0.9810
Peppers	PSNR (dB)	52.03	50.99	50.19
	SSIM	0.9938	0.9922	0.9896

同时,为了定量说明水印鲁棒性,本文进一步实施不同强度的攻击实验,在嵌入容量 25 和 30 比特下与当前主流算法^[11,13,16]进行比较,结果如表 5 和表 6 所示。

表 5 本文算法与主流算法在攻击下 BER 的比较(25 比特)

攻击类型	本文方法	文献[11]	文献[13]	文献[16]
裁剪 10%	0.040	0.060	0.053	0.006
裁剪 20%	0.160	0.138	0.073	0.009
裁剪 30%	0.160	0.142	0.076	0.019
旋转 10°	0	0.075	0.228	0.025
旋转 25°	0	0.083	0.230	0.033
中值滤波	0	0.091	0.118	0.056
椒盐噪声	0	0.050	0.074	0.006
加性高斯白噪声	0.200	0.071	0.146	0.027

表 6 本文算法与主流算法在攻击下 BER 的比较(30 比特)

攻击类型	本文方法	文献[11]	文献[13]	文献[16]
裁剪 10%	0.133	0.080	0.073	0.029
裁剪 20%	0.300	0.160	0.083	0.036
裁剪 30%	0.300	0.162	0.083	0.048
旋转 10°	0	0.091	0.237	0.071
旋转 25°	0	0.106	0.251	0.073
中值滤波	0	0.112	0.121	0.099
椒盐噪声	0	0.066	0.086	0.023
加性高斯白噪声	0.200	0.096	0.189	0.058

由表 5 和表 6 可知,本文提出的算法在遭受裁剪、旋转、中值滤波、椒盐噪声、加性高斯白噪声等攻击下仍能较高概率地正确提取水印信息。在旋转、中值滤波和椒盐噪声攻击下,本文算法完全优于其他算法;在裁剪和加性高斯白噪声攻击下,本文算法稍微弱于其他算法,这是因为本文的修改规则虽然可以得到较高的图像质量,但在遭受严重攻击后,相邻 2Bin 像素修改量的增加削弱了算法的提取准确度。从上述结果可得,本文算法可以抵抗常见的几何攻击和信号处理攻击,且由于水印信息的嵌入主要依赖于直方图的统计特性,与图像大小无关,因此,本文的水印算法可以应用于任何尺寸图像。

5 结论

本文在分析已有直方图数字水印算法的基础上,首次提出基于直方图修改的 2Bin 多进制图像水印概

念,设计分析了 2Bin 多进制图像水印的嵌入和提取算法。以 $\{0,1,2\}$ 三进制为例,设计实现了一种 2Bin 三进制图像数字水印算法。在所设计的算法中,根据水印信息容量和载体图像大小来调整算法嵌入阈值,在维持直方图相邻 2Bin 高低形状不变的情况下实现水印信息的嵌入和提取。理论分析和实验结果表明:本方法在改善图像质量的基础上极大提高了嵌入容量,并能根据实际应用达到智能均衡图像质量和水印容量的目的。然而较高压缩率的 JPEG 等操作可能会使直方图形状失真太多从而直接影响了水印的提取,同时,直接在明文图像上进行水印的嵌入和提取操作无法满足用户隐私保护的需求,如何进一步提高鲁棒性的同时在密文图像中通过直方图修改方法完成水印信息的嵌入和提取是未来的研究方向。

参考文献

- [1] Li M, Ren H, Zhang E, Wang W, Sun L, Xiao D. A VQ-based joint fingerprinting and decryption scheme for secure and efficient image distribution[J]. Security and Communication Networks, 2018, 2018: 1 - 11.
- [2] Vo P, Nguyen T, Huynh V, Do T. A novel reversible data hiding scheme with two-dimensional histogram shifting mechanism[J]. Multimedia Tools and Applications, 2018, 77(21): 28777 - 28797.
- [3] Wu M-Y, Yu M-C, Leu J-S, Chen S-K. Enhancing security and privacy of images on cloud by histogram shifting and secret sharing[J]. Multimedia Tools and Applications, 2018, 77(13): 17285 - 17305.
- [4] Kumar R, Chand S, Singh S. An improved histogram-shifting-imitated reversible data hiding based on HVS characteristics[J]. Multimedia Tools and Applications, 2018, 77(11): 13445 - 13457.
- [5] Huang Y, Kuo J, Hsieh W. Capacity controllable location map free reversible watermarking[J]. Chinese Journal of Electronics, 2015, 24(3): 519 - 523.
- [6] Hou X, Min L-Q, Yang H. A reversible watermarking scheme for vector maps based on multilevel histogram modification[J]. Symmetry, 2018, 10(9): 397 - 415.
- [7] Xuan G-R, Li X-L, Shi Y-Q. Histogram-pair based reversible data hiding via searching for optimal four thresholds[J]. Journal of Information Security and Applications, 2018, 39: 58 - 67.
- [8] Xu D-W, Chen K, Wang R-D, Su S-B. Separable reversible data hiding in encrypted images based on two-dimensional histogram modification[J]. Security and Communication Networks, 2018, 2018: 1 - 14.
- [9] Xiong L-Z, Dong D-P, Xia Z-H, Chen X-Y. High-capacity reversible data hiding for encrypted multimedia data with

- somewhat homomorphic encryption [J]. IEEE Access, 2018, 6: 60635 – 60644.
- [10] Qian Z-X, Xu H-S, Luo X-Y, Zhang X-P. New framework of reversible data hiding in encrypted JPEGbitstreams[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2019, 29(2): 351 – 362.
- [11] Xiang S-J, Kim H-J, Huang J-W. Invariant image watermarking based on statistical features in the low-frequency domain[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2008, 18(6): 777 – 790.
- [12] Deng C, Gao X-B, Peng H, An L-L, Ji F. Histogram modification based robust image watermarking approach[J]. International Journal of Multimedia Intelligence and Security, 2010, 1(2): 153 – 168.
- [13] Deng C, Gao X-B, Li X-L, Tao D-C. Local histogram based geometric invariant image watermarking[J]. Signal Processing, 2010, 90(12): 3256 – 3264.
- [14] He X-S, Zhu T, Yang G-B. A geometrical attack resistant image watermarking algorithm based on histogram modification[J]. Multidimensional Systems and Signal Processing, 2015, 26(1): 291 – 306.
- [15] Hu X-F, Wang D-S. A histogram based watermarking algorithm robust to geometric distortions[A]. International Conference on Electrical, Computer Engineering and Electronics[C]. Paris: Atlantis Press, 2015. 773 – 779.
- [16] Zong T-R, Xiang Y, Natgunanathan I, Guo S, Zhou W-L, Beliakov G. Robust histogram shape-based method for image watermarking[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2015, 25(5): 717 – 729.
- [17] Feng B-W, Weng J, Lu W. Improved algorithms for robust histogram shape-based image watermarking[A]. International Workshop on Digital Watermarking[C]. Berlin: Springer-Verlag, 2017. 275 – 289.
- [18] Yue Z, Li Z-C, Song P-F, Zhang S-M, Yang Y-X. A high-capacity watermarking algorithm using two bins histogram modification[A]. 2018 IEEE 42nd Annual Computer Software and Applications Conference (COMPSAC)[C]. New York: IEEE, 2018. 382 – 387.
- [19] Yue Z, Li Z-C, Ren H, Yang Y-X. A large capacity histogram-based watermarking algorithm for three consecutive bins[J]. Applied Sciences, 2018, 8(12): 1 – 16.
- [20] Wang S, Cui C, Niu X-M. A novel DIBR 3D image watermarking algorithm resist to geometrical attacks[J]. Chinese Journal of Electronics, 2017, 26(6): 78 – 87.
- [21] Weber A. Miscellaneous Gray Level Images[OL]. <http://decsai.ugr.es/cvg/dbimagenes/g512.php>, 2014-03-13.
- [22] Weber A. The USC-SIPI Image Database[OL]. <http://sipi.usc.edu/database/>, 2014-03-13.
- [23] Li S-J, Ahmad J-J, Saupe D, Jay Kuo C-C. An improved DC recovery method from AC coefficients of DCT-transformed images[A]. IEEE International Conference on Image Processing[C]. New York: IEEE, 2010. 2085 – 2088.
- [24] Zhang H, Shu H-Z, Coatrieux G, Zhu J, Wu Q-M-J, Zhang Y, Zhu H-Q, Luo L-L. Affine legendre moment invariants for image watermarking robust to geometric distortions[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2011, 20(8): 2189 – 2199.

作者简介



岳 桢 男, 1988 年出生, 河南新乡人. 现为北京邮电大学网络空间安全学院博士研究生, 主要研究方向为信息安全、信息隐藏、数字水印、图像处理等.

E-mail: yue_zhen@foxmail.com



李子臣 (通信作者) 男, 1965 年出生, 河南焦作人. 北京印刷学院信息工程学院教授, 博士生导师, 主要研究方向为信息安全、数字水印、数字签名、密码学等.

E-mail: lize2020@163.com



杨义先 男, 1961 年出生, 四川盐亭人. 北京邮电大学教授, 博士生导师, 主要研究方向为密码学、计算机网络与信息安全等.

E-mail: yxyang@bupt.edu.cn



游福成 男, 1964 年出生, 江西宜春人. 北京印刷学院信息工程学院教授, 硕士生导师, 主要研究方向为图像处理、机器视觉与模式识别等.

E-mail: youfucheng@bigc.edu.cn



刘福平 男, 1960 出生, 山东莒县人. 现为北京印刷学院信息工程学院教授, 硕士生导师, 主要研究方向为 3D 全息印刷、光学防伪等.

E-mail: liufuping@bigc.edu.cn