

基于预测失真的自适应两遍嵌入可逆图像水印

任 克 强, 罗 桃 建, 喻 玲 娟

(江西理工大学 信息工程学院, 江西 赣州 341000)

摘 要: 为了解决图像隐蔽性和水印嵌入容量之间相互矛盾的问题, 提出一种基于预测失真的自适应两遍嵌入可逆图像水印. 首先对图像进行分块, 利用方差衡量图像子块纹理性, 根据纹理性设置子块嵌入强度初始值; 然后对子块图像预测失真再动态调整嵌入强度; 最后利用嵌入强度自适应地进行两遍嵌入水印. 实验结果表明, 此方法可以在高容量嵌入时有效减少图像失真; 实现了高容量且有较高质量的可逆图像水印算法.

关键词: 可逆图像水印; 嵌入强度; 预测失真; 自适应; 高容量

中图分类号: TP309.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2017)08-0087-06

Adaptive Two-pass Embedding Reversible Image Watermarking Algorithm Based on Prediction Distortion

REN Ke-qiang, LUO Tao-jian, YU Ling-juan

(School of Information Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

Abstract: In order to solve the contradiction between the concealment of watermarked image and embedded watermark information capacity. A reversible image watermarking algorithm with adaptive two-pass based on prediction distortion embedding was proposed. Firstly, the image is divided into blocks, the texture complexity of the sub-blocks is measured by variance, and the initial value of sub-block embedding intensity is set according to the texture complexity, and then dynamically adjust the embedded intensity by sub-block prediction distortion. Finally, embedded watermarking is carried out by embedding intensity adaptive two-pass. The experimental results show that the proposed method can reduce image distortion effectively in high capacity embedding, A high-capacity and high-quality image reversible watermarking algorithm is implemented.

Key words: reversible image watermarking; embedding intensity; prediction distortion; adaptively embedding; high-capacity

1 引言

计算机网络以及多媒体信息的快速发展, 促使音频、视频以及图像等多媒体数字产品得到了前所未有的广泛应用. 人们可以随意下载并篡改这些多媒体数字产品, 由此造成了多媒体数字信息一系列安全问题^[1]. 数字图像可逆水印是解决现今多媒体数字信息安全的有力措施.

由于可逆水印的特殊应用价值, 近年来可逆水印受到了越来越多的研究与应用^[2]. 大量的可逆水

印算法被提出, 例如: 基于压缩域的算法^[3]、基于差值扩展技术的算法^[4]、基于直方图平移的算法^[5]和基于整数变换的算法^[6]. 文献[7]提出一种多层嵌入直方图平移可逆水印算法, 实现了水印的盲提取并显著提升了可逆水印算法的性能. 文献[8]采用预测误差直方图替代载体图像直方图来嵌入水印信息, 使得水印的嵌入容量得到了明显的提升. 文献[9]采用整数变换后的向量替换载体向量, 并用位置图标记可嵌入区域和不可嵌入区域, 再选择可嵌入区域嵌入水印信息. 文献[10]提出一种自适应整数变换

收稿日期: 2016-11-27; **修回日期:** 2016-12-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(61501210); 江西理工大学研究生创新基金项目(XS201552)

的可逆图像水印算法,该算法在较平滑区域嵌入水印信息,从而能使得含水印图像有较好的质量。

本文提出一种自适应嵌入强度的可逆图像水印算法,通过预测失真调整嵌入强度后进行两遍嵌入水印信息,从而能够在保证图像质量的情况下提高嵌入容量。

2 理论基础

差值扩展技术是对两个像素计算均值和差值并对差值部分乘 2 后进行数值扩展,然后将水印嵌入在最低有效位(Least Significant Bit, LSB). 设一对相邻像素 (x_0, x_1) 的均值 l 和差值 h 为

$$\begin{cases} l = \lfloor (x_0 + x_1)/2 \rfloor \\ h = x_1 - x_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中, $\lfloor x \rfloor$ 表示对 x 向下取整。

为了嵌入水印,对式(1)中差值 h 进行差值扩展得 $h' = 2 \times h + w$,所以嵌入水印后的相邻像素 (y_0, y_1) 为

$$\begin{cases} y_0 = l - \lfloor h'/2 \rfloor \\ y_1 = l + \lfloor (h' + 1)/2 \rfloor \end{cases} \quad (2)$$

将式(1)代入式(2)得:

$$\begin{cases} y_0 = 2x_0 - \lfloor (x_0 + x_1)/2 \rfloor \\ y_1 = 2x_1 - \lfloor (x_0 + x_1)/2 \rfloor + w \end{cases} \quad (3)$$

式中, w 为水印信息, $\lfloor x \rfloor$ 表示对 x 向上取整数。

由式(3)可知差值扩展是一种整数变换,差值扩展是对每两个相邻像素嵌入水印,需生成一个大小为原始图像一半的位置图,这将影响水印的嵌入容量. 本文对原始图像进行分块,将两个像素拓展到 $m \times n$ 个像素($m \times n$ 由原始图像划分的子块大小确定),从而使得生成的位置图减小至原始图像的 $1/m \times n$,再对 $m \times n$ 个像素同时进行整数变换。

设大小为 $M \times N$ 的原始图像,分块后每个子块有 $m \times n$ 个像素,子块向量为 $\mathbf{x} = (x_0, x_1, \dots, x_{m \times n-1})$,要嵌入的水印向量为 $\mathbf{w} = (w_1, w_2, \dots, w_{m \times n-1})$,嵌入水印后的向量为 $\mathbf{y} = (y_0, y_1, \dots, y_{m \times n-1})$,整数变换定义为

$$\begin{cases} y_0 = kx_0 - a(x_0) \\ y_1 = kx_1 - a(x_1) + w_1 \\ \dots\dots\dots \\ y_{m \times n-1} = kx_{m \times n-1} - a(x_{m \times n-1}) + w_{m \times n-1} \end{cases} \quad (4)$$

式中, k 为嵌入强度, $a(x)$ 是可逆函数,定义如下:

$$a(x) = \left[\left(2 \sum_{i=0}^{m \times n-1} x_i + (m \times n - 1) \right) \times \frac{(k-1)}{2(m \times n)} \right] \quad (5)$$

对嵌入水印后的向量 $\mathbf{y}$,恢复出原始向量 $\mathbf{x}$,可用式(6)的整数逆变换公式:

$$\begin{cases} b(y) = \frac{k-1}{m \times n} \sum_{i=1}^{m \times n-1} \left[\frac{y_i - y_0}{k} \right] \\ c(k) = \frac{(m \times n - 1)}{2(m \times n)} \times (k-1) \\ x_i = y_0 + \lfloor b(y) + c(k) \rfloor + \left\lceil \frac{y_i - y_0}{k} \right\rceil \end{cases} \quad (6)$$

式中, x_i, y_i 分别表示恢复的原始像素和嵌入水印信息后的像素, k 表示嵌入强度, $m \times n$ 为图像子块的大小. 提取的水印信息 w_i 为

$$w_i = y_i - kx_i + a(x) \quad (7)$$

3 算法描述

3.1 预测失真自适应嵌入强度

基于整数变换的可逆水印算法,根据可逆整数变换进行水印的嵌入和提取,并恢复出原始图像,其优点是算法复杂度低. 然而,由于原始图像的局部纹理特征不同,嵌入水印后的图像局部失真程度也不同. 如果对整幅图像都采用相同的嵌入强度,则没有利用到图像的局部纹理特性来减少失真和提高嵌入容量. 本文首先根据图像的局部纹理特性对图像子块采用不同的嵌入强度 k ,对不同子块用式(4)作整数变换,如果整数变换后的向量失真大于预设的失真阈值 T_h ,则调整嵌入强度;当 k 值调整完成时可以通过不同的 k 值选择子块嵌入强度。

式(4)中的 k 用于控制嵌入强度,当 $k=1$ 表示当前子块整数变换后的向量失真大于预设的失真阈值 T_h ,即不满足嵌入后的失真要求,因此不嵌入水印信息; $k=2$ 时表示每个像素嵌入1比特的水印信息; $k=4$ 时表示每个像素嵌入2比特的水印信息。

设 k_j 是根据图像子块纹理特性和预测失真来设置第 j 个图像子块的嵌入强度, $k_j = 2^n$ ($n=0,1,2$), k_j 取值的具体步骤如下所示。

S1: 设 k_j 的初值. 首先计算原始图像子块中 $m \times n$ 个像素的平均值 $\bar{x}$ 和子块方差 V :

$$\begin{cases} \bar{x} = \frac{1}{m \times n} \sum_{i=0}^{m \times n-1} x_i \\ V = \sum_{i=0}^{m \times n-1} (x_i - \bar{x})^2 \end{cases} \quad (8)$$

根据方差 V 的大小判断图像子块的局部纹理特性,设定 k_j 的初始值. 当判断子块为复杂块时初始值设为 $k_j = 2^0$ ($n=0$);当判断子块为普通块时初始

值设为 $k_j = 2^1 (n = 1)$; 当判断子块为平滑块时初始值设为 $k_j = 2^2 (n = 2)$.

S2: 预测失真. 整数变换表达式为

$$y_j = k_j x_j - (a(x_j) - w_j) \quad (9)$$

由式(9)可知, 嵌入失真主要是由 $a(x_j)$ 引起的, 当 $a(x_j)$ 越趋近于 $(k_j - 1)x_i$ 时, 失真就越小. 当子块大小为 $m \times n$ 时, 最大嵌入量为 $2(m \times n - 1)$, 根据式(10)进行预测失真:

$$(k_j - 1)x_j - a(x_j) \leq T_h \quad (10)$$

式中, T_h 为根据嵌入水印容量的大小所设定的阈值.

S3: 更新调整 k_j 的值. 如果 k_j 的初始值满足式(10)就保持 k_j 不变, 如果不满足则把 $k_j = 2^n$ 修改为 $k_j = 2^{n-1}$, 从而控制嵌入水印信息后的失真程度, 重复执行步骤 S2 和 S3 直至嵌入强度 k_j 都满足式(10), k_j 值就更新完成.

经过上面的三个步骤, 从而通过预测失真动态的调整嵌入强度, 即 $k_j = 1$ 时原始子块图像不嵌入水印信息, $k_j \neq 1$ 时对每个子块的失真采用先预测再调整嵌入强度的方式实现.

3.2 两遍嵌入过程

为了提高水印嵌入容量, 采用两遍嵌入水印的方案, 两遍嵌入是指对含部分水印的图像再次嵌入水印信息. 当第二遍嵌入水印时会导致增加图像失真. 本文采用预测失真选择嵌入强度进行两遍嵌入水印, 可以较好地控制第二遍嵌入时的失真情况. 如果在第二遍嵌入水印后失真过大, 则调整嵌入强度, 从而减少水印嵌入信息, 降低图像的失真.

下面分析说明在预测失真的情况下对于子块图像两遍嵌入的性能优于单遍嵌入. 例如: 如图1所示为一个 2×2 的图像子块, 这时 $m \times n = 4$, 子块的向量数据为 $X = (88, 86, 87, 85)$, 此处如果要嵌入6比特信息“111001”. 如图1(a)所示, 当采用单遍嵌入时 $k = 4$, 即每个像素嵌入2比特的水印信息, 采用式(4)计算嵌入后的向量数据为 $Y_1 = (92, 84, 89, 81)$. 当采用两遍嵌入水印信息时, 用式(8)计算出的方差 V 小于阈值 T_{h_1} 时把 $k_j = 2^n$ 调整为 $k_j = 2^{n-1}$ (即 $k = 4$ 变成 $k = 2$) 嵌入3比特信息, 第二遍嵌入同样计算方差 V 是否小于阈值 T_{h_2} , 满足就进行第二遍嵌入. 如图1(b)所示, 当采用两遍嵌入时 $k = 2$, 最后的 $Y_2 = (92, 86, 90, 83)$. 第一种方法带来的失真为 $\|Y_1 - X\|_2^2 = 42$, 第二种方法带来的失真 $\|Y_2 - X\|_2^2 = 39$. 可以看出对采用预测失真的子块两遍嵌入时失真更小一些.

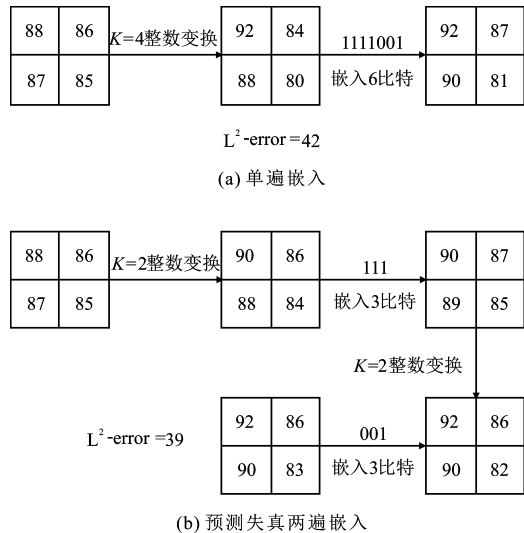


图1 单遍嵌入与两遍嵌入

第二遍嵌入水印信息时, 本文采用第二遍嵌入

时的阈值 $T_{h_2} = \frac{1}{2} T_{h_1}$ 用来保证第二遍嵌入水印信息后图像的质量.

3.3 嵌入和提取过程

3.3.1 水印的嵌入

首先对原始图像进行分块, 根据子块的纹理特性, 选择合适的嵌入强度进行整数变换, 再将生成的辅助信息通过无损压缩与水印一起嵌入变换后的图像子块中.

水印嵌入算法描述如下.

S1: 将 $M \times N$ 的原始图像 X 分为互不重叠子块, 子块大小为 $m \times n$, 共分为 $L = \lceil \frac{M}{m} \rceil \times \lceil \frac{N}{n} \rceil$ 个子块, 记为 $X = (x^0, x^1, \dots, x^{L-1})$, 每个子块的 $m \times n$ 个像素可组成整数向量 $\mathbf{x} = (x_0, x_1, \dots, x_{m \times n - 1})$, $0 \leq x_i \leq 255$.

S2: 对图像子块按 2.1 节中的方法可得到每个子块的 k_j , 通过 k_j 用式(5)确定 $a(x)$.

S3: 由 L 个子块的 k_j 值组成一个辅助序列 LM, 对 LM 进行无损压缩, 得到压缩序列 CLM.

S4: 分别对 $k_j = 2$ 和 $k_j = 4$ 的图像子块进行预测失真并整数变换后嵌入水印信息, 提取特定子块的最低有效位组成数据流 LSB, 利用 LSB 替代 CLM, 将数据流根据整数变换的方法嵌入原始图像. 最后结合 $k_j = 1$ 的图像子块就得到了含水印信息的图像 Y_1 .

S5: 对图像 Y_1 可作第二遍嵌入水印信息, 重复步骤 S1 ~ S4 嵌入后得到含水印的图像 Y_2 .

3.3.2 水印的提取

水印的提取是水印嵌入过程的相反过程,首先对含水印图像进行分块,提取子块最低有效位得到嵌入强度 k_j 值,利用各个子块的 k_j 代入进行整数逆变换,从而提取嵌入的水印和恢复出原始图像。

水印提取算法描述如下。

S1:将 $M \times N$ 的含水印图像 Y_2 分为互不重叠图像子块,读取子块的 LSB,得到压缩序列 CLM。

S2:对 CLM 解压得到辅助序列 LM,从而得到每个子块的 k_j 。可确定子块的类型是复杂块、普通块,还是平滑块,对子块通过式(6)和式(7)代入不同的 k_j 可以恢复子块图像和提取水印。

S3:将这些互不重叠图像子块重构得到图像 Y_1 ,再将图像 Y_1 分块重复步骤 S1 ~ S2 做提取水印后即可得到原始图像 X 。

4 实验结果与分析

实验平台:Windows7+MATLAB. 原始图像:4幅具有不同纹理特征的 512×512 的标准灰度图像 Lena、Airplane、Peppers、Baboon 以及一幅二值的水印图像。如图 2 所示。



图 2 原始图像和水印图像

图像的性能通过计算峰值信噪比(Peak Signal to Noise Ratio, PSNR)和归一化相关系数(Normalized Correlation Coefficient, NC)进行评价。

(1) PSNR 是评价含水印图像质量的客观标准,用于表示嵌入水印后图像的失真程度,值越大表示失真越小。计算公式如下:

$$\text{PSNR} = 10 \lg \frac{I_{\max}^2}{\frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} [I(x,y) - I'(x,y)]^2} \quad (11)$$

式中, $M \times N$ 为原始图像的大小, I 和 I' 分别表示水印嵌入前后的图像; $I_{\max}$ 是 I 中的最大像素值, $I(x,$

$y)$ 和 $I'(x,y)$ 分别是两幅图像坐标 (x,y) 处像素值的大小。

(2) NC 可以表示两幅图像之间的相似程度,当 NC 值为 1 时,表示两幅图像之间完全相同,当 NC 越小,表示两幅图像的差异越大。计算公式为

$$\text{NC} = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n W(i,j) \times W'(i,j)}{\sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n W^2(i,j)} \sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (W')^2(i,j)}} \quad (12)$$

为了衡量本文的算法性能,采用 PSNR 作为嵌入水印信息后对图像进行评价的第一个评价标准。并根据嵌入水印后图像的 PSNR 值来衡量含水印图像质量。由于对于可逆图像水印要求无失真的恢复原始图像和提取水印,采用 NC 作为对图像进行评价的第二个评价标准。对恢复的图像和原始图像进行判断 NC 值,对原始水印和提取的水印进行判断 NC 是否为 1。

图 3 是在 MATLAB 平台上对以 Airplane 为原始图像,嵌入水印容量分别是 0.1 bpp、0.5 bpp、1 bpp 的实验结果图。从图 3 可知当嵌入达 1 bpp 时,人眼视觉都无法感知,从而实现了高容量的水印嵌入。

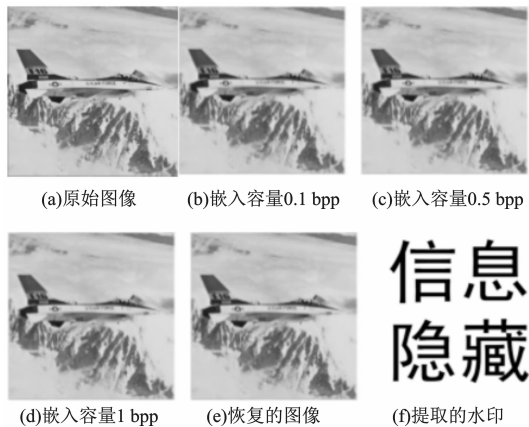


图 3 Airplane 图像的嵌入和提取

实验表明对 Airplane 采用小容量嵌入时,子块大小为 8×8 性能最好。当采用大容量嵌入时分块是 4×4 效果最好。因为小容量嵌入时,子块越小 CLM 越大,会影响嵌入效果,子块越大 CLM 越小,对嵌入水印后的图像影响越小。当大容量嵌入时,CLM 的大小相对水印容量而言对图像的影响很小。

图 4 所示为子块大小为 4×4 分块与文献[9]和文献[10]的算法进行对比,由实验结果可知,当本文采用子块大小为 4×4 的分块时嵌入水印后图像的

性能优于文献[9]和文献[10]中的算法. 当原始图像是较为平滑的 Airplane 图像时,本文算法的优越性更为明显. 对于原始图像较复杂的 Baboon 本文算法嵌入水印后图像的 PSNR 和文献[10]相差不大.



图 4 不同算法性能对比图

表 1 所示为文献[9]、文献[10]和本文算法在嵌入容量不同时 PSNR 值.

表 1 三种算法的 PSNR 比较

嵌入率/ bpp	载体图像	PSNR /dB		
		文献[9]	文献[10]	本文
0.1	Lena	49	50	52.1
	Airplane	54	51.6	54.5
	Baboon	43	43	44
	Peppers	—	48.2	51.8
0.5	Lena	41	42	42
	Peppers	43	43	44.5
	Baboon	29	32	30.5
	Peppers	—	39.5	40.5

由表 1 可知,当水印信息嵌入率为 0.1 bpp 时,本文算法的 PSNR 值平均高于文献[9]1.5 dB,高于文献[10]2.4 dB;当水印信息嵌入率达 0.5 bpp 时,平均高于文献[9]1 dB,除对于图像纹理比较复杂的 Baboon 低于文献[10]1.5 dB,对其他图像都高于文献[10].

实验结果表明,本文所采用的算法对原始图像实现了较高嵌入容量,适合用于高容量嵌入场合. 并

且算法对纹理比较平滑的原始图像嵌入水印后性能较好. 本文的算法最后提取的水印和原始水印进行判断的 $NC=1$. 即系统都可以从含水印图像中无失真的提取出水印. 再对恢复的图像与原始图像进行判断 $NC=1$,即满足了可逆的要求.

5 结束语

本文提出一种预测失真自适应两遍嵌入的可逆图像水印算法. 利用对每个子块失真程度,自适应选择嵌入强度再进行整数变换嵌入水印信息. 当两遍嵌入水印信息时,会使得嵌入水印信息后图像失真增大,本文采用了预测失真自适应嵌入算法,可以很好的保证在高容量嵌入时尽量减少失真. 当相同容量嵌入时,采用两遍嵌入水印信息比单遍嵌入水印信息具有更好的不可感知性. 阈值选择是根据纹理性不同的原始图像和嵌入水印容量决定. 特别对纹理性比较平滑的原始图像在嵌入容量和不可感知性之间有很好的平衡. 本文对纹理比较复杂的原始图像嵌入水印后的性能和现存文献相差不大,如何进一步提高纹理复杂图像的嵌入容量是后续研究的重点工作.

参考文献:

[1] 江泽涛,陈微. 基于 DWT-DCT-SVD 的彩色图像零水印算法[J]. 微电子学与计算机, 2016, 33(8): 107-111.

[2] Bo O, XIAOLONG L, YAO Z, et al. Pairwise prediction-error expansion for efficient reversible data hiding[J]. IEEE Transactions on Image Processing A Publication of the IEEE Signal Processing Society, 2013, 22(12):5010-21.

[3] QINC, CHANG C C, CHEN Y C. Efficient reversible data hiding for VQ-compressed images based on index mapping mechanism[J]. Signal Processing, 2013, 93(9):2687-2695.

[4] 罗剑高, 韩国强, 沃焱. 新颖的差值扩展可逆数据隐藏算法[J]. 通信学报, 2016, 37(2):53-62.

[5] 王祥, 李可, 付凯元, 等. 直方图平移的自适应大容量可逆水印算法[J]. 西安电子科技大学学报:自然科学版, 2014, 41(1):124-129.

[6] Weng S, Pan J S. Integer Transform based Reversible Watermarking Incorporating Block Selection[J]. Journal of Visual Communication & Image Representation, 2015, 35:25-35.

[7] 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.

[8] Rad R M, Wong K S, Guo J M. Reversible data hiding by adaptive group modification on histogram of prediction errors[J]. Signal Processing, 2016, 125: 315-328.

[9] WANG X, LI X, YANG B, et al. Efficient generalized integer transform for reversible watermarking[J]. IEEE Signal Processing Letter, 2010, 17(6): 567-570.

[10] 邱应强, 余轮. 基于整数变换的图像可逆水印方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(1):92-98.

作者简介:

任克强 男, (1959-), 教授, 硕士生导师. 研究方向为图像与视频处理、信息隐藏.
E-mail: jxrenkeqiang@163. com.

罗桃建 女, (1990-), 硕士研究生. 研究方向为信息隐藏.

喻玲娟 女, (1982-), 博士, 硕士生导师. 研究方向为合成孔径雷达信号处理、图像处理.

(上接第 86 页)

作者简介:

崔凯 男, (1991-), 硕士研究生. 研究方向为射频/微波集成电路设计.

李志强(通讯作者) 男, (1982-), 副研究员. 研究方向为射

频/微波/毫米波集成电路设计.
E-mail: lizhiqiang@ime. ac. cn.

刘昱 男, (1975-), 研究员. 研究方向为高性能模拟/射频 CMOS 集成电路、硅基毫米波集成电路.