

一种用于 JPEG 图像的高容量可逆水印算法

刘磊¹ 赵耀¹ 倪蓉蓉¹ 田华伟^{1,2}

(1. 北京交通大学信息科学研究所, 北京, 100044; 2. 中国人民公安大学防恐怖学院, 北京, 100038)

摘要: 提出一种用于 JPEG 图像的高容量可逆水印算法。该算法利用 JPEG 图像 DCT 系数的零系数间隔确定修改的位置, 利用间隔中零系数的个数确定水印嵌入量, 进而嵌入水印信息。这样做不会带来如位置图等任何额外信息。该算法利用零系数间隔准确地提取水印, 并能在水印提取后无损地恢复原始 JPEG 图像。实验结果表明, 该算法在嵌入大量水印信息的情况下仍能取得满意的 PSNR 值, 且图像文件大小的增加较小。

关键词: 数字水印; 可逆水印; JPEG 图像

中图分类号: TP391.4 **文献标志码:** A

High-Capacity Reversible Watermarking Scheme for JPEG Images

Liu Lei¹, Zhao Yao¹, Ni Rongrong¹, Tian Huawei^{1,2}

(1. The Institute of Information Science, Beijing Jiaotong University, Beijing, 100044, China; 2. School of Anti-Terrorism People's Public Security University of China, Beijing, 100038, China)

Abstract: A high-capacity reversible watermarking algorithm for JPEG images is proposed. The algorithm determines the embedding positions with the zero coefficients intervals of DCT coefficients in JPEG images. The embedding capacity is calculated based on the zero values number in each interval. Moreover, it brings no additional information, e. g. the location map. According to the zero coefficients intervals, watermark information can be extracted accurately, and the original image can be recovered losslessly. Experimental results show that the algorithm can obtain the watermarked images with high perceptual quality and high capacity, and the increment of image file size is smaller than other reversible watermarking schemes for JPEG images.

Key words: digital watermarking; reversible watermarking; JPEG image

引 言

在大多数的数字水印应用中, 原始载体都因嵌入水印发生了一定的变化, 并且这种变化通常是不可逆的^[1-3]。然而某些特殊的应用领域, 如医疗诊断、军事应用和法律诉讼等, 对图像的完整性、真实性要求比较高, 甚至不允许由于嵌入水印而带来的失真。为了满足这种需求, 出现了可逆数字水印^[4,5]。即在水印提取后, 原始载体能够被无失真地恢复。Barton 在 1997 年的专利是最早的可逆水印技术^[6]。

医疗诊断领域所涉及的图像一般为 BMP, TIFF 等无损编码格式, 法律诉讼所涉及的一般是数码相机拍摄的 JPEG 等有损编码格式的图像。目前可逆数字水印的研究多集中在 BMP 格式的图像上^[7-11]。JPEG 压缩是一种不可恢复的有损图像压缩方式, 针对这种图像的可逆水印比较困难。Xuan 等人于 2007 年提出了一种针对 JPEG 图像的可逆水印嵌入算法^[12]。Xuan 的方法利用直方图修改技术嵌入水印, 优点是可以通过选择阈值 T 和修改位置提高图像的 PSNR, 缺点是该方案设计复杂, 计算量大, 具有很高的时间复杂度。Akira 于 2008 年提出了一种利用 JPEG 图像 DCT 系数特征的算法^[13]。它通过修改每个 8×8 块 DCT 系数的最后一个非零数后的零系数, 即用新的非零数值替换原位置的“0”, 一次可以嵌入若干比特水印信息。该方案的优点是实现简单, 速度快, 对图像的修改幅度小; 缺点是嵌入容量固定、容量小, 且改变了 DCT 系数中非零系数的个数, 造成嵌入水印后的图像文件大小变化程度大。

本文提出一种用于 JPEG 图像的高容量可逆水印方案。JPEG 图像经解码能够得到量化后的 DCT 系数, 这些系数呈现一定的规律——即零系数与非零系数间隔分布。“0”间隔指在按照 Zigzag 排列后的 DCT 系数中, 两个连续非零系数之间的若干个零系数构成的间隔。如图 1 所示, 若系数 x, y 是非零系数, 则 x 与 y 之间连续的三个“0”构成了一个“0”间隔。本文通过扩展“0”间隔后的首个非零系数来嵌入若干比特水印。嵌入水印后, 再按照原来的编码方式进行编码, 得到的图像具有较高的视觉质量。水印提取过程利用相同的方法确定含水印系数的位置以及水印嵌入量, 提取水印的同时恢复系数的原始幅值, 从而可以无失真地恢复原始载体。

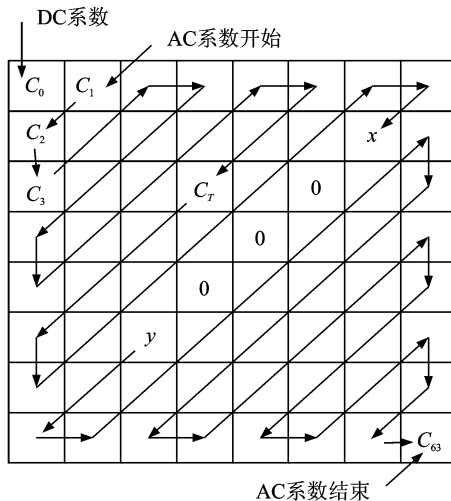


图 1 Zigzag 排列的 DCT 系数

Fig. 1 DCT coefficients in "Zigzag" list

1 基于零系数特征的 JPEG 图像可逆水印算法

JPEG 图像的 DCT 系数包含亮度分量 (Y) 和色差分量 (C_b, C_r), 可以通过修改其中任意一个或多个分量来嵌入水印信息^[5]。修改 C_b 或 C_r 分量会导致图像视觉质量变化较大, 因此本文选择通过修改 Y 分量嵌入水印。

考虑到 DCT 系数中的高频分量对图像的视觉效果影响较小, 因此设置一个位置阈值 T , 如图 1 中所示的 C_r , 只修改位于 C_r 后面的系数, 并且采用从高频到低频的倒序方式嵌入水印。

设水印信息为 $w_j \in W = \{0, 1\} (j = 1, \dots, N)$, $C_{63} \sim C_r$ 为倒序排列的量化后的 DCT 系数。若系数 C_i 满足条件 (*): $C_i \neq 0$ 且 $C_{i+1} = 0, \dots, C_{i+N_0} = 0, C_{i+N_0+1} \neq 0$ (*), 其中 N_0 为倒排后系数 C_i 前的“0”间

隔中零系数的个数,则系数 C_i 中可嵌入的水印比特数由下式决定

$$N_w = (\lceil N_0/k \rceil \bmod l) + 1 \quad (1)$$

其中参数 k 用于控制 0 间隔长度与水印量的关系,保证较短 0 间隔(长度小于 k)后的系数只嵌入 1 bit 水印。得到 N_w 值后,采用扩展 DCT 系数的方法嵌入水印,得到 C'_i

$$C'_i = 2^{N_w} \times C_i + 2^{N_w-1} \times \omega_j + 2^{N_w-2} \times \omega_{j+1} + \dots + 2^0 \times \omega_{j+N_w-1} \quad (2)$$

例如当步长参数 $l=1$ 时,每次只能嵌入 1 bit 水印;步长参数 $l=2$ 时,每次可以嵌入 1~2 bit 水印。嵌入 1 bit 或 2 bits 水印的具体公式为

$$C'_i = 2 \times C_i + \omega_j \quad (3)$$

$$C'_i = 4 \times C_i + 2 \times \omega_j + \omega_{j+1} \quad (4)$$

一般地讲,视觉质量和隐藏容量相互矛盾的。隐藏容量的增加会引起视觉质量的降低,反之亦然。在本文所提算法中,参数 k 和 l 会对水印算法的视觉质量和隐藏容量产生影响。当 k 变大时,容量就会降低,但是含水印图像的视觉质量会提高;反之亦然。当 $l=1$ 时,每次只能嵌入 1 bit 水印,产生的视觉失真较小,但是嵌入容量较低;当 $l=2$ 时,可嵌入 2 bit 水印,产生的视觉失真较大,但是嵌入容量较高。在工业应用中,可以根据视觉质量的需要选择适当的 k 和 l ,以便在可靠的视觉质量下得到较高的隐藏容量。

由于水印嵌入过程保证非零的 DCT 系数被修改后仍然非零,因此原始图像的零系数的数量和分布情况保持不变。这种特点有助于在水印提取时确定水印嵌入的位置和数量。在水印提取端,“0”间隔就充当了水印嵌入的位置图信息。通过计算每个间隔中零系数的个数,利用式(1)可以获得嵌入的水印数量为 N_w ,再应用式(5)能够正确地提取水印并无损地恢复原始图像。

$$\begin{aligned} \omega_j &= C'_i \bmod 2 \\ \omega_{j+1} &= \lfloor C'_i/2 \rfloor \bmod 2 \\ &\vdots \\ \omega_{j+N_w-1} &= \lfloor C'_i/2^{N_w-1} \rfloor \bmod 2 \\ C_i &= \lfloor C'_i/2^{N_w} \rfloor \end{aligned} \quad (5)$$

当步长参数 $l=2$ 时,在每个满足条件(*)的系数上可提取 1~2 bit 水印。通过提取系数的最低位或最低两位的值来获得水印信息,提取水印后还能恢复原始系数,分别见式(6,7)。

$$\omega_j = C'_i \bmod 2, C_i = \lfloor C'_i/2 \rfloor \quad (6)$$

$$\omega_j = C'_i \bmod 2, \omega_{j+1} = \lfloor C'_i/2 \rfloor \bmod 2, C_i = \lfloor C'_i/4 \rfloor \quad (7)$$

2 水印嵌入过程

水印嵌入过程如图 2 所示,设水印信息为 $\omega_j \in W = \{0, 1\} (j=1, \dots, N)$,嵌入步骤如下。

(1)对 JPEG 载体图像进行 Huffman 解码和游程解码,得到量化后的 DCT 系数。

(2)提取每个 8×8 块的 DCT 系数的 Y 分量 C_i ,并按 Zigzag 扫描顺序排列。

(3)对每个 8×8 块的 64 个系数,在位置区间 $[T, 63]$ 内逆序寻找满足条件 $C_i \neq 0$ 且 $C_{i+1} = 0, \dots, C_{i+N_w} = 0, C_{i+N_w+1} \neq 0$ 的系数 C_i ,利用式(1)计算该位置要嵌入的水印数量 N_w ,利用式(2)嵌入 N_w 比特水印。当参数 $l=2$,具体化为利用式(3)或式(4)嵌入 1~2 bit 水印。

(4)循环执行步骤(3),直到水印全部嵌入。

(5)对修改后的系数进行游程编码和 Huffman 编码,得到含水印的图像。

3 水印提取过程

水印提取过程如图 3 所示,步骤如下。

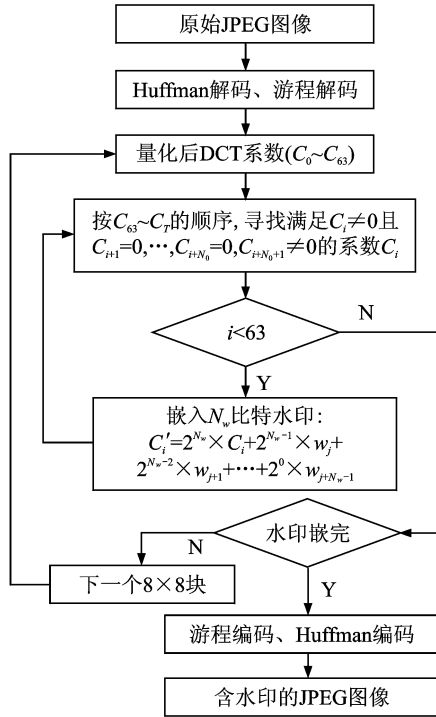


图 2 水印嵌入过程

Fig. 2 The process of watermark embedding

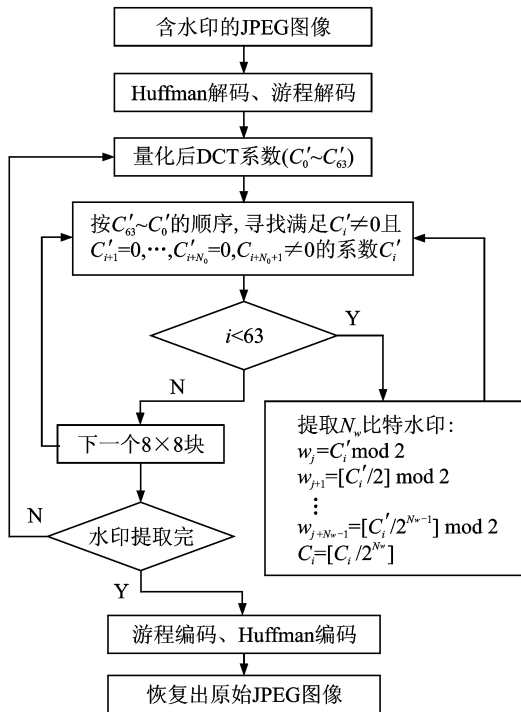


图 3 水印提取过程

Fig. 3 The process of watermark extracting

(1)对含有水印的 JPEG 图像进行解码得到量化后的 DCT 系数,提取每个 8×8 块的 DCT 系数的 Y 分量 C'_i ,并按 Zigzag 扫描顺序排列。

(2)对每个 8×8 块 64 个系数,在位置区间 $[T, 63]$ 内逆序寻找满足条件 $C'_i \neq 0$ 且 $C'_{i+1} = 0, \dots, C'_{i+N_w} = 0, C'_{i+N_w+1} \neq 0$ 的系数 C'_i ,利用式(1)计算该位置能嵌入的水印数量 N_w ,再应用式(5)提取水印并恢复原始系数。当参数 $l=2$,具体化为应用式(6)或式(7)提取 1~2 bit 水印并恢复原始系数。

(3)循环执行步骤(2),直到水印全部提取。

(4)对恢复后的 DCT 系数按照图像本身的编码方式进行编码,恢复原始图像。

4 实验结果与分析

实验所用图像来自标准测试图像库,利用 Matlab7.1 软件将位图(BMP)格式的彩色文件转化为 JPEG 格式的彩色图像。所有图像像素大小均为 256×256 , R, G, B 各分量亮度为 $0 \sim 255$,实验测试图像如图 4 所示。



图 4 测试图像

Fig. 4 Test images

本文提出的算法很好地发掘了 JPEG 图像嵌入水印的能力,具有容量大的优点,同时还可以通过改变阈值 T 、量化参数 k 和步长参数 l 的大小方便地调节容量大小。令 $k=15, l=2$,分别取 $T=10, 20, 30, 40$,应用第 3 节所述的算法对图 4 中的 6 幅图像进行水印嵌入,测得数据见表 1。由表 1 中数据可以看出,当参数 k, l 不变时,嵌入量随着阈值 T 的增大迅速减小,这是由于在 JPEG 图像的 DCT 系数中,后半部分系数大部分是零,带来嵌入空间有限。阈值 T 减小时,容量较大,同时又能保持满意的图像质量。当 $T=10$ 时,嵌入水印后的图像如图 5 所示。

在无损编码的图像中(例如 BMP 图像),由于未采用压缩编码方式,嵌入水印后载体图像的文件大小并不会有多少改变。JPEG 图像采用了压缩编码方式,文件大小主要与 DCT 系数中非零系数的大小、个数和分布位置有关,这些因素直接影响游程编码和 Huffman 编码的效率以及编码后数据的幅值大小。因此,针对 JPEG 的可逆水印方案往往会增大载体图像的文件大小。本文的方案在嵌入水印时改变了 DCT 系数中亮度分量 Y 的值,也会导致嵌入水印后图像的文件大小有所增加,但与 Akira 方法比

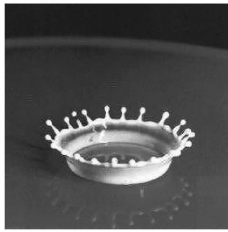
较,增加的幅度较小。

表 1 不同阈值下载体嵌入量与 PSNR

Table 1 The capacity and PSNR under different thresholds

阈值 T	Milkdrop		Girl		Lena	
	嵌入量/ 10^3 bpp	PSNR	嵌入量/ 10^3 bpp	PSNR	嵌入量/ 10^3 bpp	PSNR
10	21.881	33.45	38.467	9.617	57.8	14.45
20	8.987	34.80	13.794	3.448	29.922	7.48
30	4.547	35.44	5.127	1.282	16.907	4.227
40	1.389	38.23	1.297	0.324	9.674	2.419

阈值 T	Airplane		Pepper		Baboon	
	嵌入量/ 10^3 bpp	PSNR	嵌入量/ 10^3 bpp	PSNR	嵌入量/ 10^3 bpp	PSNR
10	61.371	26.97	63.4	28.36	132.599	22.23
20	39.154	27.48	31.173	29.02	106.155	22.56
30	22.247	28.15	15.518	30.02	74.493	23.02
40	10.559	30.00	6.683	32.29	46.692	24.45



(a) Milkdrop (33.45 dB)



(b) Girl (31.24 dB)



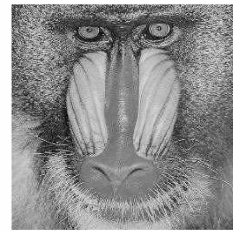
(c) Lena (27.97 dB)



(d) Airplane (26.97 dB)



(e) Pepper (28.36 dB)



(f) Baboon (22.23 dB)

图 5 嵌入水印后的图像($T=10$)

Fig. 5 The images after embedding ($T=10$)

文献[13]中 Akira 方法一次只修改 8×8 块中的一个系数,可以嵌入若干比特水印信息;若某块中最后一个系数非零,则该 8×8 块不嵌任何水印。由于文献[13]所给数据是在每个 8×8 块中只修改一个系数的条件下得到的,为了与 Akira 方法进行比较,调整式(1)中的参数 $l=1$,即一次只嵌入 1 bit 水印,并且每个 8×8 块中也只修改第一个满足条件的非零系数(靠近 C_{63} 的第一个非零系数),嵌入 1 bit 水印信息。在嵌入量相同的情况下,本文的方法对文件大小的影响要小于 Akira 方法,如图 6 和表 2。

图 6 所示的是在嵌入相同容量的水印信息后,不同图像的文件大小增加量情况。从图中可以看出,除了 Lena 图像以外,本文的方法造成的文件大小增加量要远远小于 Akira 的方法造成的文件大小增加量。表 2 更为详细地给出了两种算法的容量与文件大小变化的情况。在相同的载体图像中嵌入等量的水印信息,两种

方法得到的文件大小发生了不同程度的变化。比如,对于 Milkdrop 图像,原始的文件大小是 7 498 Byte,嵌入 943 Byte 水印后,应用 Akira 方法得到的文件大小为 7 846,应用本文方法得到的文件大小是 7 799。

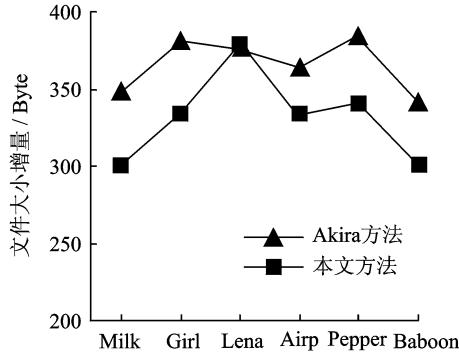


图 6 等嵌入量时文件大小增量对比^[13]

Fig. 6 File size increments compared with Akira's method^[13]

表 2 嵌入量相同情况下的文件大小

Table 2 File sizes of watermarked images with same capacities

载体图像	原始大小/B	Akira 方法		本文方法	
		嵌入量/ 10^{-3} bpp	嵌入后大小/Byte	嵌入量/ 10^{-3} bpp	嵌入后大小/Byte
Milkdrop	7 498	14.389	7 846	14.389	7 799
Girl	9 967	15.503	10 348	15.503	10 301
Lena	13 359	15.503	13 735	15.503	13 738
Airplane	13 571	14.999	13 935	15.198	13 904
Pepper	15 070	15.488	15 455	15.625	15 411
Baboon	23 173	13.153	23 515	13.168	23 474

5 结束语

本文提出了一种用于 JPEG 图像的高容量可逆水印方案,较好地解决了 JPEG 图像可嵌容量小的问题。同时,通过设置阈值 T 以及修改量化参数 k 和步长参数 l 来调整容量大小,以便达到容量和图像质量的平衡。本文方法在嵌入大量水印的情况下得到的图像仍然具有较高的视觉质量。在解码端将水印提取后,可以完全恢复原始载体图像。在有损压缩编码的图像中嵌入水印,往往会改变原有系数中零系数的分布,降低压缩编码的效率,导致载体图像文件大小的改变。本文方法不改变非零 DCT 系数的个数,有利于减小文件大小的变化。

参考文献:

- [1] 谢春辉,程义民,陈扬坤. 数字图像中扩频水印的盲提取方法[J]. 数据采集与处理, 2011, 26(1): 26-30.
Xie Chunhui, Cheng Yimin, Chen Yangkun. Blind extraction method for spread-spectrum watermark on digital image[J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2011, 26(1): 26-30.
- [2] 王丽,赵媛媛,赵耀. 一种抗剪切的鲁棒数字水印[J]. 数据采集与处理, 2006, 21(3): 330-333.
Wang Li, Zhao Yuanyuan, Zhao Yao. Digital image watermarking resistant to cropping attacks[J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2006, 21(3): 330-333.
- [3] Tian H, Zhao Y, Ni R, et al. Geometrically robust image watermarking by sector-shaped partitioning of geometric-invariant regions[J]. *Optics Express*, 2009, 17(24): 21819-21836.

- [4] Tian J. Reversible data embedding using a difference expansion[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2003,13(8):890-896.
- [5] Weng S W, Zhao Y, Pan J S, et al. Reversible watermarking based on invariability and adjustment on pixel pairs[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2008,15:721-724.
- [6] Barton J M. Method and apparatus for embedding authentication information within digital data[P]. U S Patent 5,646,997, 1997.
- [7] Fridrich J, Goljan M, Du R, et al. Lossless data embedding for all image formats[C]//Proceedings of the SPIE Security and Watermarking of Multimedia Contents. San Jose, CA: [s. n.], 2002, 572-583.
- [8] Alattar A M. Reversible watermark using the difference expansion of a generalized integer transform[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004,13(8):1147-1156.
- [9] Ni Z, Shi Y Q, Ansari N, et al. Reversible data hiding[J]. IEEE Transaction on Circuits and Systems for Video Technology, 2006,16(3):354-362.
- [10] 朱立,赵耀,倪蓉蓉. 基于混合整数变换的高容量可逆数字水印 [J]. 数据采集与处理,2010,5(2):188-194.
Zhu Li, Zhao Yao, Ni Rongrong. High-capacity reversible watermarking based on mixed integer transform[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2010,25(2):188-194.
- [11] Coltuc D. Improved embedding for prediction-based reversible watermarking[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2011,6(3):873-882.
- [12] Xuan G, Shi Y Q, Ni Z, et al. Reversible data hiding for JPEG images based on histogram pairs[C]//4th International Conference on Image Analysis and Recognition (ICIAR2007). Montreal, Canada: [s. n.], 2007:715-727.
- [13] Akira Shiozaki, Motoi Iwata, Akio Ogihara. Reversible watermarking method for JPEG images[J]. IEICE Transactions on Information and Systems, 2008,9(7):2069-2071.

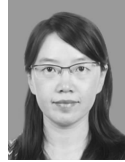
作者简介:



刘磊(1985-),男,硕士研究生,研究方向:数字水印,E-mail:Liulei010@163.com。



赵耀(1967-),男,教授,研究方向:图像压缩编码、数字水印、视频图像检索,E-mail:yzhao@bjtu.edu.cn。



倪蓉蓉(1976-),女,教授,研究方向:信息隐藏与多媒体取证,E-mail:rmi@bjtu.edu.cn。



田华伟(1983-),男,博士,研究方向:数字水印、信息隐藏与多媒体取证。

