

用于 JPEG2000 图像认证的半脆弱性数字水印算法

张 静,张春田

(天津大学电子信息工程学院,天津 300072)

摘 要: 本文给出一种适用于 JPEG2000 图像认证的半脆弱性数字水印算法,该算法与 JPEG2000 编、解码器相结合,它根据 JPEG2000 图像压缩过程中的不变参量进行水印生成和嵌入调制,利用小波变换特性对图像篡改区域进行定位.实验表明,采用该算法实现的水印不仅具有良好的视觉透明性,而且还有较佳的篡改区域指示功能.

关键词: JPEG2000; 图像认证; 数字水印

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2004) 01-0157-04

Semi-Fragile Watermarking for J PEG2000 Image Authentication

ZHANG Jing, ZHANG Chun-tian

(School of Electronic Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: In this paper, a semi-fragile watermarking algorithm is proposed for JPEG2000 image authentication. The algorithm is combined with the JPEG2000 image coding process. The watermark is generated and embedded based on an invariant property of DWT coefficients during the JPEG2000 compression. Once the watermarked image is tampered, the alteration regions can be located according to primary properties of the wavelet transform. The experimental results demonstrate that the watermarked image possesses good perceptual transparency, and that the proposed algorithm can detect any change to the watermarked JPEG2000 image as well as locate the tampered areas.

Key words: JPEG2000; image authentication; digital watermarking

1 引言

采用数字水印技术进行网络传输中的图像认证,已成为当前信息认证领域的研究热点.根据对篡改的敏感性不同,用于图像认证的数字水印可分为脆弱性和半脆弱性两类^[1],脆弱性水印主要用于完全级认证,半脆弱性水印则主要用于内容级认证.此前,关于脆弱性水印的报道较多,关于半脆弱性水印的报道则大多是基于原有静止图像压缩标准 JPEG 的,而基于新标准 JPEG2000 的半脆弱性数字水印,目前还少有文献报道.本文提出一种适用于 JPEG2000 图像认证的半脆弱性数字水印算法,文章结构安排如下:第 2 部分简述 JPEG2000 图像压缩编码中的量化过程,第 3 部分介绍水印算法的具体实施步骤,第 4 部分给出了算法实验结果,第 5 部分对全文进行总结.

2 JPEG2000 静止图像压缩编码中的量化过程^[2]

JPEG2000 图像压缩编码时,先对源图像进行小波变换,再对小波系数实施量化,然后进行嵌入式算术编码(即将量化后的小波系数组织成位平面,从最高有效位平面开始,依次对每个位平面上的小波系数位进行算术编码).对图像进行有损

压缩时,算术编码过程可随时终止(也称做码流截取),以满足用户所要求的码率.码流截取后,若截去位平面数为 n ,这相当于以 2^n 为步长对小波系数再次进行量化,因此,总的量化步长应等于第一次量化步长的 2^n 倍.但由于位平面上各小波系数位采用的编码操作可能不同,再加上码流截取点也可能正好处于位平面内部,故各小波系数的第二次量化步长并不完全相同(即 n 可能不同),但每个小波系数的再次量化步长肯定为 2 的乘幂. JPEG2000 中的小波变换有整型和浮点型两种,由于用于图像认证的(半)脆弱性水印一般对计算中的舍入误差较为敏感^[3],故我们针对 JPEG2000 中基于整型(5/3)小波变换的压缩编码系统进行水印算法设计.

3 用于 JPEG2000 图像认证半脆弱性数字水印算法

3.1 小波系数的四分树(Quad tree)结构及小波块定义

图像的离散小波变换(DWT)给出了图像在不同分辨率上的表示^[4],每个 DWT 系数反映了图像在局部空域和局部频域上的内容.图像的 DWT 系数具有一个四分树结构,即某一分辨率上的图像区域在更为精细的下一分辨率上被分成四块较小的区域来表示(如图 1(b)所示).图 1 给出图像局部空域与相关 DWT 系数的映射关系.对于如图 2 所示的 5/3 小波^[5],

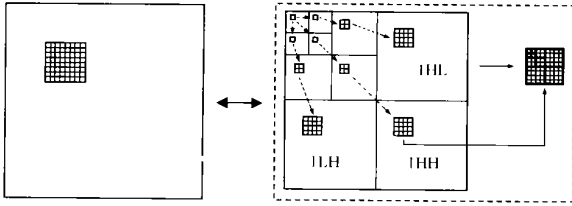


图 1 图像块与小波块的映射关系 (a) 空间域的图像块; (b) 与图 (a) 图像块相关的 DWT 系数的四分树结构及小波块定义

由于小波函数支集长度较大, 在函数中心振幅之外还有一些幅度较小的余振, 故与图像同一局部空域相关的 DWT 系数一般会更多一些 (将以图 1 (b) 所示的位置为中心向四周稍有扩散), 这样一来, 在空间域互不相交的两个相邻的图像块, 与其相关的小波系数集则可能彼此有所重叠, 故严格说来, 图 1 所示的映射关系并不成立. 但对于紧支集小波来说, 这种重叠一般面积较小, 而且位于重叠区域内的 DWT 系数, 因其幅值较小, 对图像块的影响也相对较弱. 故图 1 (a) 中所示的图像块, 可近似由图 1 (b) 中的 DWT 系数集来表征, 我们将这些系数组织成如图 1 (b) 右方所示的矩形块, 称其为与图 1 (a) 中图像块相对应的小波块. 根据这种映射关系, 若把图像在空间域划分成同样大小、互不相交的图像块, 则每个图像块都有一个小波块与之相对应, 而且这些小波块也是互不相交的. 我们把沿一个图像行方向排列的图像块集合所对应的小波块集合定义为一个波块行.

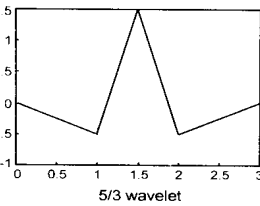


图 2 5/3 小波函数

3.2 水印生成与嵌入调制

算法的关键是水印信息必须能够承受 JPEG2000 的量化压缩. JPEG2000 中的量化为向下取整方式, 即如果对 x 用步长 Q 进行量化, 则量化结果为:

$$x_Q = \text{sign}(x) \cdot \lfloor \text{abs}(x) / Q \rfloor \quad (1)$$

上式中, $\lfloor x \rfloor$ 表示不大于 x 的最小整数.

反量化后的结果为:

$$\tilde{x} = \text{sign}(x_Q) \cdot (\text{abs}(x_Q) + 0.5) \cdot Q \quad (2)$$

参考文献 [1], 不难证明如下法则成立:

法则 1 如果式 (1) 中的 $x = k \cdot Q_M$, $k \in \mathbb{Z}$ 并且 $Q_M > Q$, 则下式成立:

$$\lfloor \frac{\tilde{x}}{Q_M} \rfloor = k \quad (3)$$

其中, $\lfloor x \rfloor$ 表示对 x 进行四舍五入取整. 由式 (1)、(2)、(3) 可知, 当某一 DWT 系数被调整到量化步长 Q_M 的整数倍后, 如果采用小于 Q_M 的量化步长 Q 进行压缩编码, 则根据式 (3), 该 DWT 系数可在解码端被精确地恢复出来. 我们下面将依据此法则进行水印嵌入调制.

水印嵌入时, 首先把图像的 DWT 系数划分成小波块, 而后选择 $Q_M = \{TQ_i, i = 1, 2, \dots, m\}$, 其中 TQ_i 为子带 i 在满足

图像主观质量要求下可以采用的最大量化步长, m 为小波子带数目. 选择 Q_M 后, 紧接着在每个小波块中选择重要系数作为水印嵌入点, 重要系数选择方法为:

$$\text{if } \lfloor \text{abs}(x_i) / TQ_i \rfloor > T_i, T_i \in \mathbb{Z}, \text{ 则 } x_i \text{ 为重要系数} \quad (4)$$

式 (4) 中, x_i 为子带 i 中的 DWT 系数, T_i 为对应于子带 i 的重要系数阈值.

水印信息是在嵌入过程中生成的, 其生成框图如图 3.

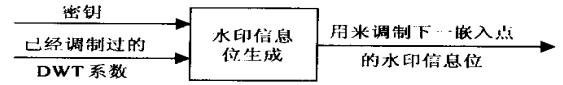


图 3 水印信息生成

对于第一个重要系数 x_0 , 将其修改为步长 Q_M 的整数倍 wx_0 , 设 x_0 位于子带 i 中, 则

$$wx_0 = \text{sign}(x_0) \cdot \lfloor \text{abs}(x_0) / TQ_i \rfloor \cdot TQ_i \quad i \in \{1, 2, \dots, m\} \quad (5)$$

而后, 将所选的其余 L 个重要系数 $x_j (j = 1, 2, \dots, L)$ 按如下方法调制为 wx_j :

设 $\text{sign}(x_j) \cdot \lfloor \text{abs}(x_j) / TQ_i \rfloor = k$, 则

$$wx_j = \begin{cases} k \cdot TQ_i & \text{if } \text{LSB}(k) = WB_j \\ \text{sign}(x_j) \cdot (\text{abs}(k) + 1) \cdot TQ_i & \text{if } \text{LSB}(k) \neq WB_j \end{cases} \quad (6)$$

式 (6) 中, $\text{LSB}(k)$ 表示 k 的最低有效位; WB_j 为嵌入点 x_j 所对应的水印信息位, 其值由下式计算得出:

$$WB_j = \text{MOD}[(PSnum \oplus wx_0 \oplus \dots \oplus wx_{j-1}), 2] \quad (7)$$

式 (7) 中, $\text{MOD}[x, 2]$ 代表 x 对 2 进行求模运算, \oplus 为异或运算符, $PSnum$ 为根据密钥生成的伪随机数.

对于不满足式 (4) 的非重要系数 nx_i , 若 nx_i 满足下式:

$$\lfloor \text{abs}(nx_i) / TQ_i \rfloor = T_i, T_i \in \mathbb{Z} \quad (8)$$

则 nx_i 经 Q 量化和反量化后, 在解码端可能会满足重要系数条件, 从而造成水印提取失误. 为此, 在进行水印嵌入时, 对小波块中满足式 (8) 的 nx_i 进行如下修改:

$$nx_i = \text{sign}(nx_i) \cdot T_i \cdot TQ_i \quad (9)$$

实际操作中, 图像平坦区所对应的小波块几乎没有重要系数, 为了对平坦区也能进行有效认证, 我们将小波块根据其包含的重要系数数目划分为纹理块和平坦块两类, 再将每个小波块行按其包含的纹理块数目划分成宏块: 若该小波块行中不包含纹理块或只包含一个纹理块, 则由该行中的所有的小波块构成一个宏块; 不然, 则将该小波块行划分为若干个宏块, 每个宏块包含几个相邻的小波块, 其中有且仅有一个纹理块. 宏块划分方法见图 4.

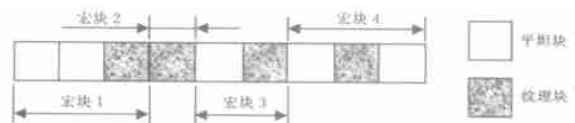


图 4 对小波块进行宏块划分

如图 4 所示, 每一小波块行中, 除最末的纹理块外, 其余每个纹理块均与其左邻的若干个平坦块一起组成一个宏块; 若其左邻为非平坦块, 则该纹理块自身构成一个宏块; 最末一个纹理块则与其左右两方相邻的平坦块一起组成宏块. 水印

嵌入时,对每个宏块分别进行操作,自左到右扫描宏块中的小波块,对每个小波块按照分辨率自低到高的顺序逐层逐带(LL子带除外)选择重要系数进行调制,对于平坦块,有几个重要系数则修改几个重要系数;对于纹理块,设定嵌入容量上限 nWB ,若纹理块中的重要系数数目小于或等于 nWB ,则对该块中的所有重要系数均进行修改,否则,只修改前 nWB 个重要系数(在满足认证需求的前提下,嵌入水印信息越少,图像的视觉质量越好)。

3.3 图像认证检测

图像认证时,首先扫描判断每个小波块所包含的重要系数数目,小波块各子带(LL子带除外)重要系数判定方法为:

$$\text{if } [abs(x_i)/TQ_i] > T_i - T_i - Z, \text{ 则 } x_i \text{ 为重要系数} \quad (10)$$

再根据图 4 所示方法对每行小波块进行宏块划分,而后对每个宏块分别进行水印提取和认证检测。水印提取时,按照与嵌入过程相同的顺序,根据平坦块和纹理块的水印嵌入容量来确定嵌入点;然后根据法则 1,由各嵌入点系数恢复出 $\{wx_i, i=0, 1, \dots, L\}$,并从 $\{wx_j, j=1, 2, \dots, L\}$ 中提取出相应的水印信息,比较提取的水印信息与根据 $\{wx_i, i=0, 1, \dots, L-1\}$ 生成的水印信息是否一致,若二者不一致,则认为该宏块所对应的各图像块已被篡改。但如 3.1 节中所述,对于 5/3 小波来说,图 1 中图像块和小波块的映射关系是近似成立的,对某一图像块的篡改将不仅导致与之对应的小波块系数发生变化,与该小波块相毗邻的小波块系数多少也会发生一定程度的变化,但由于 5/3 小波函数的紧支集特性,这种变化不会波及太远,而且这种波动总是以该图像块所对应的小波块为中心向四周扩散。所以,若对水印图像的某一局部区域篡改后,根据上述算法,一般会有较多的图像块被标示为篡改区(相对于实际篡改区而言),而实际篡改区肯定被包含在这些标示的图像块中,并且一般位于标示区的中心,故把标示的图像区域向着该区域中心紧缩一部分后将会得到更为理想的篡改区域指示结果。我们对算法标示的

篡改区域按图 5 所示方法进行紧缩。如图 5 所示,若实际篡改区为颜色最深的中心块,而认证算法标示出图中 5 个块均为篡改区,其中周遭的四个块为虚警区,这四个块的共同特征是:每块最近邻的四个块中有三个块未被标示出错,我们称具有这种特征的块为虚警块,将标示区中所有的虚警块剔除,便可得到紧缩后的篡改标示区。

但还应注意,算法标示篡改区域的最小单元为图像块,对于面积较小的篡改区,若该区域恰好位于几个图像块中间(即与几个图像块都相交),则算法将会标示这几个图像块均出错。再者,由于算法依据图像的纹理特征进行宏块划分,若图像被篡改,则可能会出现水印嵌入、检测过程中宏块划分不同步的情形,但由于小波变换的空域和频域局部性,再加上算法对每个小波块行各自独立进行宏块划分(这相当于在每个小波块行的起始端添加了再同步信息),因此,在检测中出现宏

块同步信息丢失情形时,算法一方面会提供篡改指示,同时也可以很快地恢复再同步,从而将丢失同步信息造成的误判限制在较小范围内。

4 实验结果

实验中,我们采用 JPEG2000 工作组推荐的 JPEG2000 压缩编码系统软件^[6],但该软件在采用 5/3 整型小波变换对图像进行有损压缩时,仅仅靠码流截取来实现量化(图像的第一次量化步长为 1),为提高图像压缩质量,我们参照 JPEG2000 中 9/7 浮点小波变换有损压缩系统中的量化方法,按照式(11)对每一子带计算量化步长^[2]:

$$b = \frac{(1 - 2^{R_b}) \cdot 2^{R_b}}{\sqrt{b}} \quad (11)$$

式(11)中, b 为子带 b 的量化步长, R_b 为子带 b 的标准动态范围(Normal dynamic range), R_l 为像素的位深(Bit depth), b 为子带 b 的能量权因子(Energy weight)。我们对 $512 \times 512 \times 8$ 的测试图像进行 5 层分解,分解后得到的小波子带集为 sub-Band = $\{\{5LL, 5HL, 5LH, 5HH\}, \{4HL, 4LH, 4HH\}, \{3HL, 3LH, 3HH\}, \{2HL, 2LH, 2HH\}, \{1HL, 1LH, 1HH\}\}$,然后由式(11)计算出每一子带的量化步长,再根据 3HL 子带的量化步长对计算结果进行标准化和取整^[7],最后得出对应于 subBand 的各子带量化步长集为 $= \{\{1, 1, 1, 2\}, \{1, 1, 2\}, \{1, 1, 3\}, \{2, 2, 4\}, \{4, 4, 7\}\}$ 。我们对第一次量化后的 DWT 系数进行水印嵌入,这样,选择 Q_M 时只需考虑第二次量化即可。实验中发现,一般情况下,图像经 JPEG2000 以 0.5bpp 的码率压缩后,绝大多数测试图像主观质量良好;而以 < 0.5 bpp 的码率压缩后,已有相当一部分图像出现较大失真,为此,我们选择 0.5bpp 的压缩码率作为可接受的图像压缩。经实验测试,选择 $Q_M = \{\{-3, 3, 3\}, \{3, 3, 5\}, \{5, 5, 9\}, \{9, 9, 17\}, \{17, 17, 17\}\}$ (由于对 5LL 子带不进行水印嵌入,故选择 Q_M 时不考虑 5LL 子带)。水印嵌入时,选取各子带(5LL 子带除外)的 DWT 重要系数阈值为 1,将重要系数数目大于 3 的小波块划分为纹理块,其余的为平坦块;选择 $nWB = 8$ 。

实验中,为避免水印嵌入及小波变换可能引起的溢出误差,我们首先将图像灰度的动态范围调整在 $[5, 250]$ 以内,而后再进行水印嵌入和 0.5bpp 压缩编码;图像认证可在解码端的压缩码流中进行,也可将压缩码流解码成图像,再将图像变换到 DWT 域进行检测(未经篡改的水印图像用这两种检测方式均能通过认证)。我们将解码后的水印图像以 RAW 格式保存,用 PHOTOSHOP 软件对其进行修改,将修改后的图像再以 0.5bpp 压缩成 JP2 格式,而后在解码端对其认证。对篡改标示区进行紧缩时,我们按图 5 所示的方法进行,若紧缩后的标示区中仍有图像块满足虚警块条件,则再次进行紧缩,直至标示区中没有虚警块为止。实验结果见图 6(图中的原始图像是经 0.5bpp 压缩后的图像,水印图像是经 0.5bpp 压缩并且嵌入水印的图像)。由图可见,水印图像与原始图像在主观视觉上并没有明显差异,算法标示的篡改区域在紧缩前已有较好的局部定位能力,紧缩后则得到更佳的篡改区域指示效果。

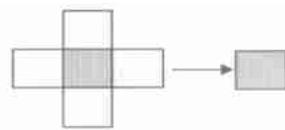


图 5 对标示的篡改区域进行紧缩

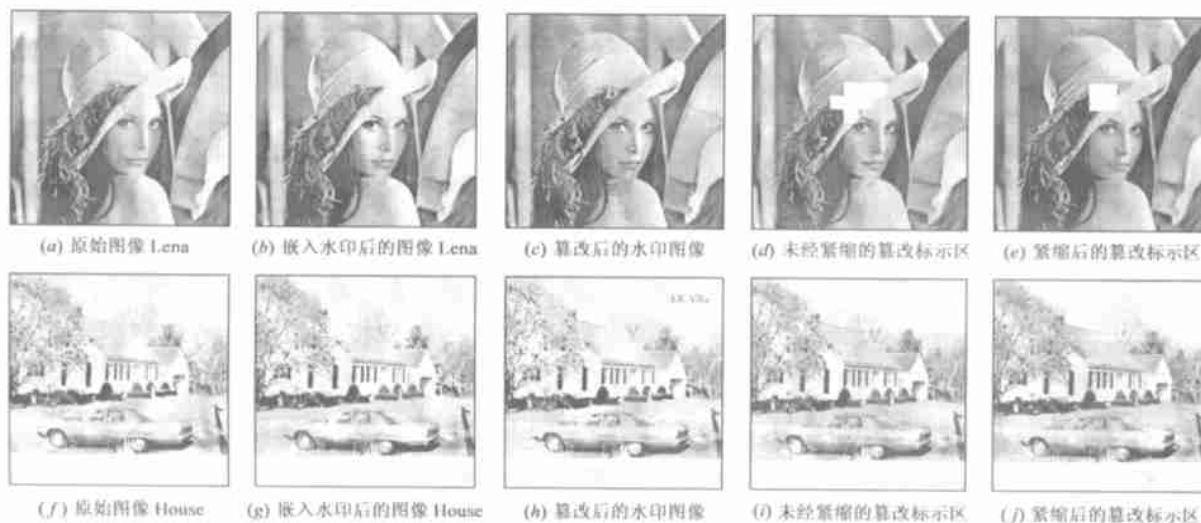


图 6 图像认证实验结果

5 结论

本文给出一种用于 JPEG2000 图像认证的半脆弱性数字水印算法,该算法具有如下特点:

(1) 算法根据 JPEG2000 图像压缩过程中的不变参量进行水印生成和嵌入调制,由此实现的图像认证系统具有较高的可靠性;

(2) 算法选择图像的 DWT 重要系数进行水印嵌入调制,并根据图像的纹理特征自适应调整宏块大小,既实现了图像纹理区、平坦区的有效认证,又使嵌入水印后的图像具有很好的视觉透明性;

(3) 算法充分利用小波变换的空域和频域局部性来定位图像篡改区域,从而获得良好的篡改区域指示效果;

(4) 该水印算法与 JPEG2000 图像编、解码系统完全融合在一起,简单易行。

本文实验中所采用的 DWT 重要系数阈值 T_i 和量化步长 Q_M ,其值主要由实验测试确定,可适用于 0.5bpp 压缩编码的一般自然图像;为了能适应不同压缩程度的各类图像,进一步研究可考虑采用自适应技术来确定这些参数。

参考文献:

- [1] C Y Lin, S F Chang. Semi-fragile watermarking for authentication JPEG visual content [A]. Proc. of SPIE [C]. San Jose, CA, 2000, 3971: 140 - 151.
- [2] ISO/IEC JTC1/SC29/WG1 ISO/IEC FCD 15444-1 [DB/OL]. <http://www.jpeg.org/FCD15444-1>.
- [3] 华先胜,石青云. 易损数字水印若干问题的研究 [J]. 中国图象图形学报, 2001, 6(11A): 1089 - 1095.
- [4] Justin K R, Hyeokho Choi, et al. Bayesian Tree-structured image mod-

eling using wavelet-domain hidden markov models [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, 10(7): 1056 - 1068.

- [5] Michael D Adams, Faouzi Kossentini. Reversible integer-to-integer wavelet transforms for image compression: performance evaluation and analysis [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2000, 9(6): 1010 - 1024.

[6] <http://jj2000.epfl.ch/>.

- [7] Ali Bilgin, Philip J. Sementilli, et al. Scalable image coding using reversible integer wavelet transforms [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2000, 9(11): 1972 - 1977.

作者简介:



张 静 女, 1972 年 6 月生于河南睢县, 2002 年获天津大学信号与信息处理专业博士学位, 现在天津大学电子科学与技术博士后流动站工作, 主要从事数字图像、数字视频与数字水印技术研究。



张春田 男, 1939 年 2 月生于天津市, 1963 年毕业于北京大学无线系, 天津大学电子信息工程学院教授、博士生导师, 从事数据压缩与编码理论、信息隐藏与数字水印、数字视频、HDTV 等方面研究。