

一种鲁棒的基于 DWT 域自适应量化步长的 图像盲水印算法

张专成 张殿富 闫小萍

(武警工程学院通信工程系, 西安 710086)

摘要 提出了一种可用于版权认证的基于小波变换域自适应量化步长的图像盲水印算法。该算法首先在 DWT (离散小波变换) 的低频子带中选择感知重要系数作为水印的嵌入区间, 然后选择一个同时可满足不可见性与鲁棒性要求的最小量化步长, 对所选择的重要系数进行量化, 再通过自适应增大量化步长, 把二值水印信息交替地嵌入到不同的量化层上。作为这种算法的一个特例, 就是用所选系数的低 5 位表示水印信息。在嵌入过程中, 根据小波变换所具有的良好空域局部化特性, 采用了分块舍入技术, 实现了水印信息的精确嵌入; 在检测过程中, 提出了一种新颖的差分检测方法, 增强了系统的鲁棒性。实验结果证明, 该算法具有嵌入信息量大, 水印透明性好, 对各种常见的图像处理操作、有损压缩、裁剪和几何变换抵抗性强等特点。

关键词 离散小波变换 图像水印 分块舍入 差分检测 量化步长

中图分类号: TP391.41 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2006)06-0840-08

A Robust Image Blind Watermarking Algorithm Based on Adaptive Quantization Step in DWT

ZHANG Zhuan-cheng, ZHANG Dian-fu, YAN Xiao-ping

(Department of Communication Engineering of Engineering College of the People's Armed Police Force of China, Xi'an 710086)

Abstract A new image blind watermarking algorithm based on adaptive quantization step in discrete wavelet transform (DWT) is proposed, which can be used in copyright authentication. In the proposed algorithm, the perceptually significant coefficients are selected from LL subband to be the embedding domain, and a minimum quantization step, which guarantees the invisibility and robustness, is used to quantify the selected coefficients. The binary watermarks are alternately embedded on the different quantified levels by adaptively increasing the quantization step. As a special example, the least 5 bits of the selected coefficients are utilized to express the watermark. Considering the localization character of wavelet transform in spatial domain, a block-based rounding method is adopted to achieve the purpose of precise embedding. As to the detecting algorithm, a novel difference detecting algorithm is created to improve the robustness of system. The experimental results show that the proposed algorithm has the following characters: large information capacity, invisibility and robustness against attacks such as some common image processing operations, lossy compression, cropping and some geometric transformations etc.

Keywords discrete wavelet transform (DWT), image watermarking, block-based rounding, difference detecting, quantization step

1 引言

随着新一代图像压缩标准 JPEG2000^[1] 的提出,

小波变换越来越受到重视。在数字水印和信息隐藏中, 已经出现不少基于小波变换的算法, 但在这些算法中^[2-4], 小波图像低频系数总是被明显地排除在外。而文献[5]根据小波图像系数的分布特点和对

收稿日期: 2005-11-19; 改回日期: 2005-08-16

第一作者简介: 张专成(1948~), 男, 教授, 硕士研究生导师。1982年毕业于西安交通大学信息与控制工程系自动控制专业获工学硕士学位。主要从事数字图像处理、小波变换在图像处理中的应用等方面的教学与科研工作。E-mail: zhangzhuancheng@yeah.net

小波系数振幅的定性、定量分析,认为低频子带更适合水印嵌入。事实上,无论是在低频子带还是在高频子带,只要嵌入强度不超过以韦伯比表示的可感知界限,都是可以嵌入水印的。图像经过小波变换之后,由于能量聚集的结果,相对于高频系数来说,低频系数的绝对值一般要大得多,从不可感知的要求考虑,可供改变的绝对量也大得多,而在各种压缩或滤波处理中,低频系数又可得到比高频系数更好的保护,所以,在低频子带嵌入水印信息,不仅可以保证不可感知的要求,而且还将具有较强的鲁棒性。

基于以上考虑,提出一种新的基于小波变换域自适应量化步长的图像盲水印算法。该算法首先在 DWT (离散小波变换)的低频子带中选择感知重要系数作为水印的嵌入区间,然后选择一个同时可满足不可见性与鲁棒性要求的最小量化步长,对所选择的重要系数进行量化,再通过自适应增大量化步长,把二值水印信息交替地嵌入到不同的量化层上。作为这种算法的一个特例,就是用所选系数的低 5 位表示水印信息。在嵌入过程中,该算法根据小波变换所具有的良好空域局部化特性,采用了分块舍入技术,实现了水印信息的精确嵌入;在检测过程中,该算法提出了一种新颖的差分检测方法,增强了系统的鲁棒性。水印检测时不需要原始图像。实验结果证明,本文算法具有嵌入信息量大,水印透明性好,对各种常见的图像处理操作、有损压缩、裁剪、几何变换抵抗性强等特点。

2 水印嵌入算法

2.1 基本算法

为了便于说明问题,首先介绍在小波变换低频系数低 5 位嵌入水印信息的方法^[5],然后逐渐引出自适应量化步长的概念。低 5 位表示水印信息的基本原理是把水印信息“1”和“0”调制到低频系数的模 32 整数环的两个不同位置上,一个位置表示“1”,另一个位置表示“0”。为了增强水印的鲁棒性,这两个位置在模 32 整数环上的距离应该最大。例如用二进制数“11000”和“01000”分别代表水印信息“1”和“0”,如图 1 所示,这两个二进制数在模 32 整数环上具有最大距离,能容许的误差范围为 $(-8, 8)$,具有最大的噪声容限。嵌入算法的基本框图如图 2 所示。

具体操作过程如下:

(1)产生水印序列 利用密钥 K 产生一个二值随机序列 W ,序列长度为 N 。

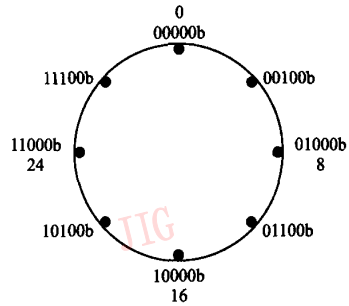


图 1 5 位二进制数在模 32 整数环上的距离

Fig. 1 The distance of 5bit binary number in the circle of integer mod 32

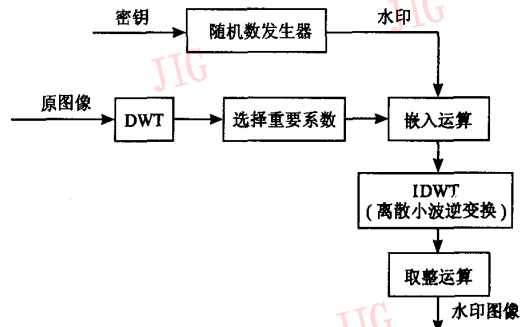


图 2 水印嵌入框图

Fig. 2 The block diagram of watermarking embedding system

(2)小波分解 对大小为 $M \times M$ 的图像进行 L 级小波分解之后,形成一个金字塔结构的子带序列,按照空间分辨率由低到高的顺序,从顶层到底层的子带依次为 $LL_L, HL_L, LH_L, HH_L, HL_{L-1}, LH_{L-1}, HH_{L-1}, \dots, HL_1, LH_1, HH_1$ 。其中 L 取决于水印序列的长度 N ,使得 $M \times M / 2^{2L} \geq N$ 。

(3)选择嵌入区间 将 LL 子带通过逐行扫描变成 1 维向量 C ,找出其中前 N 个最大的系数值,并把它们的坐标按照从小到大的顺序依次存放在 $1 \times N$ 的索引矩阵 I 中。

(4)嵌入运算 设 k 为正整数,根据图 1 所示,如果嵌入的是信息“1”,其系数值应该是 $32k + 24$,如果嵌入的是信息“0”,其系数值应该是 $32k + 8$,根据使水印图像与原图像均方误差最小的准则,若用 X 表示原系数值,那么,嵌入结果应该满足下式的约束要求。

$$\begin{cases} \text{嵌入信息“1”时} \\ -16 \leq X - (32k + 24) < 16; \\ \text{嵌入信息“0”时} \\ -16 \leq X - (32k + 8) < 16 \end{cases} \quad (1)$$

经过适当的运算,由式(1)可得基本嵌入公式,

$$\begin{cases} \text{如果 } W(i) = 1 \\ C(I(i)) = 32 \times \lfloor (C(I(i)) - 8) / 32 \rfloor + 24; \\ \text{如果 } W(i) = 0 \\ C(I(i)) = 32 \times \lfloor (C(I(i)) + 8) / 32 \rfloor + 8 \end{cases} \quad (2)$$

其中, $i = 1, 2, \dots, N$ 。

式(2)中的 $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示取整运算。按照式(2)嵌入水印信息后,原来的前 N 个最大系数值发生了变化,其中有些可能与未嵌入水印的系数混在了一起,不再属于前 N 个最大系数,所以,还需要把嵌入水印的系数与没有嵌入水印的系数区分开来,为此,首先,找出经过调制以后携带水印信息的最小系数值 C_{\min} ,然后按照下式对低频子带的所有系数进行修正。

$$\begin{cases} \text{如果 } C(i) > C_{\min} - 16, \text{ 且 } i \text{ 不在 } I \text{ 中} \\ C(i) = C_{\min} - 16; \\ \text{其他} \\ C(i) = C(i) \end{cases} \quad (3)$$

其中, $i = 1, 2, \dots, M \times M / 2^{2L}$ 。

按照式(3)修正以后,就在嵌入水印的系数与没有嵌入水印的系数之间建立起了一个距离为 16 的隔离带,确保嵌入水印的系数是前 N 个最大系数。

(5)将向量 C 还原为 $(M/2^L) \times (M/2^L)$ 的矩阵,进行小波逆变换。

(6)取整运算,将小波变换之后获得的双精度型图像数据转换为无符号整型(uint8型)。

2.2 分块舍入与精确嵌入

图像显示、存储和传输时采用的是无符号整型数,这就意味着,在进行完小波逆变换之后,还需要进行一次将图像数据由双精度型转换为无符号整型数的取整运算。这个看似简单的问题却会给图像水印的鲁棒性带来很大的影响。显然,在没有受到任何攻击的情况下,人们期望提取出的水印系数应该等于嵌入时的水印系数。但是,由于在嵌入过程中,取整运算引入了舍入误差,结果即使在没有受到任何攻击的情况下,提取出的水印系数就可能已经不等于嵌入时的水印系数了。实践表明,如果采用常规舍入方法,即一个系数一个系数地进行四舍五入运算,会引入较大的舍入误差,如表 1 所示。表 1 中列出了在 $256 \times 256 \times 8$ 的 Lena 图中嵌入 200bit 水印后的某段位置上的 10 个系数值,表 1 的第 1 行是嵌入的水印信息,第 2 行是期望的嵌入水印信息后的系数值,第 3 行是常规舍入后,再对水印图像进行小波变换得到的系数值。实验数据表明,采用常规舍入方法,使水印信息受到了严重的舍入污染,最严重时,在没有受到任何攻击以前,水印系数的实际值与期望值之差可达到 50% 的噪声容限,例如,表中的下划线数据与期望值之差等于 4,这样就大大削弱了水印的鲁棒性。

表 1 分块舍入与常规舍入的嵌入结果比较

Tab. 1 Comparison of the embedding results between block-based rounding and common rounding method

	水印信息									
	0	0	1	0	1	1	1	1	0	1
期望嵌入结果	1224	1576	1240	1448	1560	1112	1112	1304	1640	1432
常规舍入结果	1227	1574	1238	1447	<u>1564</u>	1114	1112	1301	1638	1434
分块舍入结果	1224	1576	1240	1448	1560	1112	1112	1304	1640	1432

为了防止舍入过程对水印信息的污染,本文算法采用了一种分块舍入的方法,该方法是基于小波变换在空域具有良好的局部化特性而设计的。对 L 级“Haar”小波分解来说,一个低频系数是由空域相应位置的 $2^L \times 2^L$ 个像素的平均值决定的,其他小波分解也近似如此。因此,本文算法将小波逆变换后的双精度图像数据分成 $2^L \times 2^L$ 大小的块,将每一块数据的整数部分和小数部分分别记为两个矩阵: E 和 F ; 求矩阵 F 中各元素的和 s ; 找出 F 中的最大

值,将其对应的 E 中的值加 1,同时 s 减 1; 再找 F 中的下一个最大值,按照上述方法修改矩阵 E 和 s , 如此循环,直到 s 小于 0.5。这种分块舍入方法,由于充分利用了小波变换系数的空域局部化特性,最大限度地减小了舍入误差,从而达到了精确嵌入的目的。表 1 的第 4 行是分块舍入后,再对水印图像进行小波变换得到的系数值,该值与第 2 行的期望值完全相等。对其他小波也进行了类似的实验,均获得了与“Haar”小波一致或近似一致的结果,证明了

分块舍入方法的有效性。保证水印信息精确嵌入,就像通信系统要求信源发出的信息是没有受到任何污染,噪声只是在信道中发生的一样,其重要性是不言而喻的。

3 水印检测算法

3.1 位置检测法

在载体的低5位嵌入水印信息的方法,就是将水印信息“0”和“1”分别调制到载体的模32整数环的两个不同的位置上。在本文算法中,信息“0”和“1”在模32整数环上的位置分别是8和24。根据水印信息的嵌入机理,最基本,也是最容易想到的盲检测方法是,先对图像进行小波变换,再找出LL子带中前 N 个最大系数 CM ,进行模32运算(取最低5位),以16作为判决阈值,判决规则如下:

$$\begin{aligned} \text{if } CM(n) \bmod 32 \geq 16 \quad W(n) = 1; \\ \text{else } W(n) = 0; \end{aligned}$$

称这种方法为“位置检测法”。

3.2 差分检测法

3.2.1 原理、步骤与量化步长

实验证明,位置检测法抗JPEG压缩的能力较差。为了提高算法的鲁棒性,提出一种差分检测方法。差分检测的原理是基于对这样一种事实的考虑,当用低频带的前 N 个最大系数的低5位表示水印信息的时候,就意味着降低了这些系数的量化精

度,扩大了量化步长,使其等于16。在没有受到任何攻击的情况下,如果把嵌入水印信息的系数按大小顺序排列,那么,同一量化层上的系数就会集中出现在某一段上,这个序列在同一量化层区间上的后向差分等于零,从高量化层向低量化层转变时的后向差分等于16。在受到一定程度的某种攻击(例如JPEG压缩)之后,完全可以设想,同一量化层上的系数,仍在某一近似值的上下波动,而不同量化层之间仍存在一个明显的差值,那么,如果把嵌入水印信息的系数再按大小顺序排列,同一量化层上的系数也会集中出现在某一段上,这个序列在同一量化层区间上的后向差分将远远小于从高量化层向低量化层转变时的后向差分,如图3(a)所示,图3(a)是在 $256 \times 256 \times 8$ Lena图中按第2节所述算法嵌入200bit水印,经过JPEG($Q=60$)压缩后实测的后向差分曲线(只画出了前40个点)。在算法中设计一个二类别分类器,对受攻击以后的后向差分进行分类,将靠近零的一类用0表示,另一类用1表示,1反映了从较高量化层向相邻较低量化层的一次转变,这样一来,就恢复了嵌入水印信息时的系数量化层次,如图3(b)所示,其中等于1的点与量化层的转变一一对应。然后,根据“0”和“1”信息交替出现的原则,如果确定了最高量化层系数所携带的信息,就可推断出其他各量化层系数所携带的信息。由此可见,差分检测之所以有效,就是因为它试图恢复的是嵌入水印信息时的系数量化层次,而不是系数值本身。

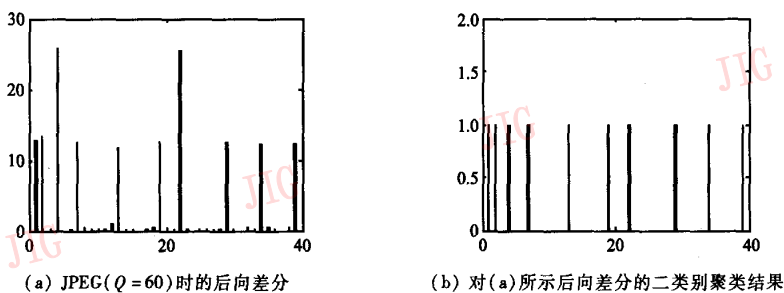


图3 差分检测原理说明

Fig. 3 The block diagram of difference detecting algorithm

对只需要检测水印有无的1比特水印系统来说,差分检测的处理过程如图4所示,其具体步骤如下:

- (1) 根据密钥产生原始水印序列 $W(n)$, $n=1, 2, \dots, N$;
- (2) 对被测图像进行 L 级小波变换,将LL子带

通过逐行扫描变成1维向量 C ;

(3) 找出 C 中前 N 个最大系数,将第 N 个系数作为阈值 T ;

(4) 对 C 进行扫描,将凡是大于等于 T 的系数提取出来,建立一个扫描列表 $LS(n)$:

$$LS(n) = \{p, c, w\} \quad (n=1, 2, \dots, N) \quad (4)$$

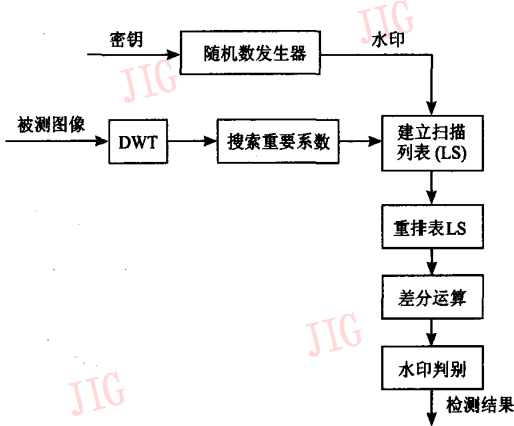


图 4 差分检测法框图

Fig. 4 The block diagram of difference detecting algorithm

其中, p 表示系数的位置序号, c 表示系数值, w 表示原始水印;

(5) 按照式(4)中的系数值 c 由大到小的顺序, 对 $LS(n)$ 进行排序, 得列表 $LN(n)$;

(6) 差分运算包括

① 计算序列:

$$CD(n) = LN(n).c - LN(n+1).c \quad (n = 1, 2, \dots, N-1) \quad (5)$$

$$WD(n) = LN(n).w \oplus LN(n+1).w \quad (n = 1, 2, \dots, N-1) \quad (6)$$

其中, \oplus 为异或运算符。

② 采用二均值聚类法^[6], 对 $CD(n)$ 进行数值分类, 将其转换为 0,1 序列 $CL(n)$ 。

(7) 水印判别采用 BCR(比特正确率)作为水印相似性度量准则, 当 BCR 值大于某一阈值时, 则认为该图像中存在有水印信息。BCR 的定义由下式给出:

$$BCR = \frac{\sum_{n=1}^{N-1} WD(n) \oplus CL(n)}{N-1} \times 100\% \quad (7)$$

从上述步骤可以看出, 对只需要检测水印有无的 1 比特水印系统来说, 并不需要确定各量化层系数所携带的水印信息, 因为它把水印的相似性度量转换成了序列 $CL(n)$ 和 $WD(n)$ 的相似性度量。其中 $CL(n)$ 是由被测图像产生的, 而 $WD(n)$ 是由原始水印产生的。

从差分检测过程可以看出, 差分检测是依靠系数之间的差值来识别信息的, 并不关心“0”和“1”两种信息分别被调制在模 32 整数环的什么位置, 从这

个意义上说, 使用差分检测可以将“0”和“1”两种信息调制在模 32 整数环的任何位置上, 只要它们之间的距离等于 16 就可以了, 这个距离就是量化步长。模 32 整数环上的最典型的位置当然是 0 和 16, 如果用 0 和 16 分别代表信息“0”和“1”, 那么携带水印信息的系数的二进制表示将具有如下两种形式:

$$\begin{cases} xx \cdots xx10000 & \text{携带信息“1”} \\ xx \cdots xx00000 & \text{携带信息“0”} \end{cases} \quad (8)$$

如果撇开式(8)中全为 0 的低 4 位不管, 那么它就与文献[7]提出的 LSB 算法在形式上完全一致了, 低 4 位 0 的存在, 加大了量化步长, 增强了鲁棒性。式(8)还显示出, 携带信息“0”的系数值是 16 的偶数倍, 而携带信息“1”的系数值是 16 的奇数倍。显而易见, 对差分检测来说, 并不要求量化步长一定要等于 16, 如前所述, 用低频系数的低 5 位表示水印信息, 即量化步长等于 16 只不过是自适应量化步长算法的一个特例。量化步长直接影响着水印的鲁棒性和不可见性, 量化步长大一些, 鲁棒性就会好一些, 而不可见性又会差一些, 反之亦然。所以, 量化步长应该在鲁棒性与不可见性之间折中地去选择。用 Δ 表示任意量化步长, 类似于式(1), 下式给出了最小均方误差准则下一般量化步长算法应该满足的约束条件,

$$\begin{cases} \text{如果携带的是信息“1”} \\ -\Delta \leq X - (2\Delta \times k + d + \Delta) < \Delta; \\ \text{如果携带的是信息“0”} \\ -\Delta \leq X - (2\Delta \times k + d) < \Delta \end{cases} \quad (9)$$

式(9)中 d 表示位移量, 用来控制水印在以 2Δ 为模的整数环上的位置。经过适当运算, 由式(9)可得基本嵌入公式,

$$\begin{cases} \text{如果 } W(i) = 1 \\ C(I(i)) = 2\Delta \times \lfloor (C(I(i)) - d) / \Delta / 2 \rfloor + d + \Delta; \\ \text{如果 } W(i) = 0 \\ C(I(i)) = 2\Delta \times \lfloor (C(I(i)) - d + \Delta) / \Delta / 2 \rfloor + d \end{cases} \quad (10)$$

其中, $i = 1, 2, \dots, N$ 。

相应地, 将式(3)中的 16 用 Δ 代替, 就可得建立隔离带公式:

$$\begin{cases} \text{如果 } C(i) > C_{\min} - \Delta, \text{ 且 } i \text{ 不在 } I \text{ 中} \\ C(i) = C_{\min} - \Delta; \\ \text{其他} \\ C(i) = C(i) \end{cases} \quad (11)$$

其中, $i = 1, 2, \dots, M \times M / 2^L$ 。

容易验证, 式(2)是式(10)在 $d = 8, \Delta = 16$ 时的

一种特例;式(8)是式(10)在 $d=0, \Delta=16$ 时的一种特例。不失一般性,本文用到的所有例子都是以式(2)为嵌入公式计算出来的。

3.2.2 嵌入矫正与自适应量化步长

以上关于差分检测的原理是以假设嵌入水印信息后量化层从大到小无断层为前提的。所谓无断层是指将原作嵌入水印信息的系数按大小顺序排列后,相邻两个量化层之间总是相差1个量化步长,而“0”、“1”信息也总是交替地被放置在各个量化层上。但是这种假设并不完全成立。例如,用不同的密钥另外生成1个长度为200bit的随机序列,按第2节的嵌入算法,把它嵌入到 $256 \times 256 \times 8$ 的Lena图中,其前10个最大系数的嵌入结果如表2所示,表2的第1行为水印信息,第2行为矫正前的水印系数值,第3行为矫正前水印系数的后向差分值。由表2中的下划线数据可知,最高量化层与次高量化层之间相差了2个量化步长,在这两个相邻的量化层上嵌入的都是信息1,而与之对应的后向差分却出现了不为0的异常情况,这就破坏了差分检测的基础——“0”、“1”信息在相邻量化层上交替出现的格局。这种现象是由于

系数值分布不均匀引起的。在系数值分布比较稀疏的区间上,由于相邻两个系数值之间的差距比较大,就有出现断层的可能,而量化层的缺失,又可能导致相邻量化层上嵌入的是同一信息这种情况发生。解决这个问题就是让量化步长是自适应的,即随着系数值分布密度的变化而变化,在系数值分布密度较稠的区间选择较小的量化步长,在系数值分布密度较稀的区间选择较大的量化步长。由于嵌入水印的系数是前 N 个最大系数,统计结果显示,在越接近最大值的区间,系数值分布越稀疏,越容易出现断层现象,在这个区间,一则由于系数的绝对值比较大,二则由于系数之间的差值比较大,在嵌入水印信息的时候,为它们选择较大的量化步长,是与不可感知的要求相吻合的。自适应量化步长的实现非常简单,首先,按照式(2)或式(10)嵌入水印信息,并按照式(3)或式(11)建立隔离带,然后进行嵌入矫正,即检查是否存在相邻两个量化层上嵌入了同一信息现象,如果存在这种现象,就用均值替代的办法将这两个量化层加以合并,也就是说,把这两个量化层上的系数统一设置为它们原值的平均值,如表2的第4行所示。

表2 相邻两个量化层上嵌入了同一信息的情况

Tab.2 An instance of contiguous quantified layers embedded in the same watermarking

	水印信息									
	<u>1</u>	<u>1</u>	<u>1</u>	<u>1</u>	0	0	0	1	1	1
矫正前嵌入结果	<u>1688</u>	<u>1688</u>	<u>1656</u>	<u>1656</u>	1640	1640	1640	1624	1624	1624
矫正前后向差分	<u>0</u>	<u>32</u>	<u>0</u>	<u>16</u>	0	0	16	0	0	0
均值矫正结果	<u>1665</u>	<u>1665</u>	<u>1665</u>	<u>1665</u>	1640	1640	1640	1624	1624	1624

矫正以后的量化层与相邻量化层之间的步长将大于未经矫正的量化层之间的步长,这样,用均值替代的办法使量化步长自然而然地实现了自适应。由于量化步长是自适应的,所以式(10)中的量化步长,实际上是兼顾鲁棒性与不可见性二者的要求而选择的最小量化步长,容易想象得到,最小量化步长选择得越小,越容易出现断层现象,需要均值替代的区间就会越多,而自适应的特征也会表现得越明显。至此,对图2中的嵌入运算模块可以给出一个更加完整的描述:在自适应量化步长算法中,所谓嵌入运算实际上是由3个子过程组成的,按照计算顺序,它们的功能依次为按照式(10)(或式(2))嵌入水印,按照式(11)(或式(3))建立隔离带,以及用均值替

代的办法进行嵌入矫正。

4 实验结果

4.1 可分性及阈值选择实验

为了验证式(7)的有效性,并确定水印检测中相关测试的阈值,可首先进行可分性及阈值选择实验。方法是首先随机生成2000个长度为200bit的水印信号,其中第800个水印信号为嵌入的水印信号,然后由差分检测法计算 $CL(n)$ 和 $WD(n)$ 的相关性,结果如图5所示。实验结果表明,随机生成的水印信号与嵌入的水印信号的最大相关值在0.6左右,因此,可以将检测阈值定为0.65。

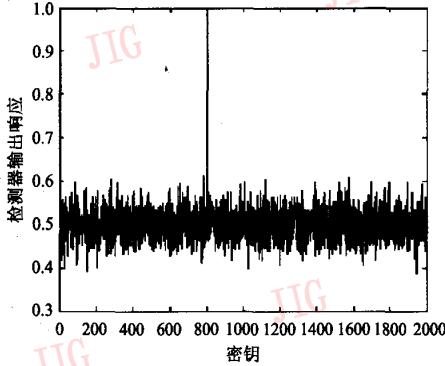


图 5 阈值选择实验

Fig. 5 Experiment of selecting threshold

4.2 水印嵌入容量与不可见性实验

由小波变换的原理可知,对 L 级 Haar 小波分解的低频子带系数施加一个改变量 Δ ,经过反变换之后,在相应位置上 $2^l \times 2^l$ 的块中,每个系数所承受的改变量为

$$\delta = \Delta/2^l \quad (12)$$

本文算法在正常情况下对低频系数的改变量最大为

一个量化步长 Δ ,所以式(12)给出的也是在空域对像素的最大改变量。因为量化误差服从均匀分布,所以在空域对像素的平均改变量等于 $\delta/2$ 。在本文所用例子中,量化步长等于 16,分解级数 L 等于 3,在空域像素的最大改变量为 2,平均改变量为 1。实验中选用的测试图像为图 6(a)所示的 $256 \times 256 \times 8$ 的 Lena 标准图像。信噪比随嵌入容量的变化情况如图 6(c)所示。由图可以看出,嵌入最大长度 1024bit 水印时,峰值信噪比仍可达到 45.84dB,对应的水印图像如图 6(b)所示。从图 6 可以看出,视觉效果上嵌入 1024bit 水印前后两图没有什么差别,这说明该算法具有很好的不可见性。

4.3 水印鲁棒性实验

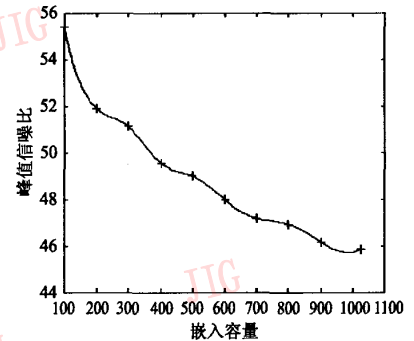
表 3 中列出了采用“位置检测法”和“差分检测法”对嵌入 200bit 和 1024bit 水印图像进行抗 JPEG 压缩实验的结果。由表 3 可以看出,位置检测法抵抗 JPEG 压缩的能力较差,当质量因子低于 80 时已不能完全无误地检测出来,而差分检测法直至质量因子等于 50 时 (PSNR(峰值信噪比)等于 32dB),仍能完全无误地检测出嵌入信息,可见差分检测法具



(a) Lena 原图



(b) 嵌入 1024bit 水印图像



(c) PSNR 随嵌入容量的变化

图 6 水印的不可见性实验结果

Fig. 6 Results of invisibility experiment of watermarking

表 3 两种检测算法的抗 JPEG 压缩性能比较

Tab. 3 Comparison of two detecting method resisting JPEG compression

水印长度 (bit)	质量因子 Q	90	80	70	60	50	40	30
200	PSNR (dB)	39.0639	35.7882	34.1434	33.0257	32.1870	31.4156	30.4444
	位置检测法 BCR	1	0.9800	0.9950	1	0.3450	0.7950	0.5550
	差分检测法 BCR	1	1	1	1	1	0.8291	0.5628
1024	PSNR (dB)	38.4921	35.5140	33.9658	32.8914	32.0113	31.3242	30.3778
	位置检测法 BCR	1	1	1	0.999	0.5771	0.7920	0.6133
	差分检测法 BCR	1	1	1	1	1	0.8016	0.6149

有很好的抗压缩性能。仔细分析表 3 中的检测结果,进一步还可发现,位置检测法的 BCR 值变化剧烈,具有起伏现象,说明位置检测法的偶然性较强,可信度较低;而差分检测法的 BCR 值变化平稳,没有起伏现象,随着攻击强度的增大呈下降趋势的规律性较强,可信度较高。

此外还对加了水印的 Lena 图像进行了其他一些常见的攻击实验,实验结果如表 4 所示。由表 4 可见,本文算法对常见的图像处理操作,如添加噪声、线性和非线性滤波、图像裁剪、伸缩变换和像素交换等也都具有较好的鲁棒性。

表 4 水印图像抵抗其他攻击的实验结果

Tab. 4 The experiment results of watermarked image resisting other attacks

攻击	200 bit 水印		1 024 bit 水印	
	PSNR(dB)	BCR	PSNR(dB)	BCR
4% 随机噪声	30.373 6	0.778 9	30.117 7	0.711 6
高斯噪声	32.371 4	0.678 4	32.225 7	0.746 8
3×3 中值滤波	30.574 2	0.819 1	30.520 3	0.733 1
高斯低通滤波	36.194 1	0.874 4	32.516 5	0.831 9
1/16 剪切	52.816 3	0.974 9	46.087 6	0.956 0
1/4 剪切	53.569 9	0.864 3	47.092 1	0.852 3
0.5 伸缩	33.54	0.790 4	28.160 4	0.846 5
2.0 伸缩	36.72	1	45.840 1	1
2° 旋转	25.582 4	0.718 2	25.288 3	0.923 8
5° 旋转	25.504 9	0.703 5	21.255 3	0.850 4
10_row_200_row 像素交换	32.489 1	0.959 8	32.287 1	0.960 9
1_col_256_col 像素交换	29.239 1	0.763 8	29.182 6	0.942 3

5 结 论

提出了一种新的可用于版权认证的基于 DWT 域自适应量化步长的图像盲水印算法,虽然文中所有例子都是以式(2)为嵌入公式计算出来的,但是该算法本身对任意的量化步长,只要满足不可见性与鲁棒性要求,都是适合的。与现有的同类算法^[5]

相比较,该算法具有以下优点:

(1)把在低频系数低 5 位嵌入水印信息的方法发展为一种自适应量化步长方法,对携带信息的低频系数采用了自适应量化技术。

(2)为了适合图像的传输、存储和显示,需要将嵌入水印的图像数据由双精度型转换成整型。针对这一问题,提出了一种“分块舍入法”,使水印能够精确嵌入,从根本上消除了舍入噪声对所加水印的污染,增强了鲁棒性。而这一点在以前的基于 DWT 的算法中并没有提到过。

(3)提出了一种新颖的“差分检测法”。与传统的“位置检测法”相比较,该算法大大提高了水印图像抗压缩攻击的能力。

实验结果表明,本文提出的算法对常见的一些图像处理操作具有较好的鲁棒性,另外,该算法还具有可嵌入信息容量大,运算速度快,可操作性强等特点。

参 考 文 献 (References)

- 1 JPEG 2000 FINAL COMMITTEE DRAFT VERSION 1.0 [EB/OL]. <http://jpic.org/public/fed15444-1.pdf>, 2000-03-16.
- 2 Kundur D, Hatzinakos D. A robust digital watermarking method using wavelet-based fusion [A]. In: IEEE Signal Processing Society 1997 International Conference on Image Processing (ICIP'97) [C], Santa Barbara, California, 1997:544 ~ 437.
- 3 Tsai M, Yuang K, Chen Y. Joint wavelet and spatial transformation for digital watermarking [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2000, 46(1): 241 ~ 245.
- 4 Xia X G, Boncelet C G, Arce G R. Wavelet transform based watermark for digital images [J]. Optics Express, 1998, 3(12): 497 ~ 511.
- 5 Liu Hong-mei, Liu Jiu-fen, Huang Ji-wu, et al. A robust DWT-based blind data hiding algorithm [J]. Circuits and Systems, 2002, 3(2): 672 ~ 675.
- 6 Qing Shen, Lin Tang. Introduction to Pattern Recognition [M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 1991: 108 ~ 109. [沈清, 汤霖著. 模式识别导论 [M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1991: 108 ~ 109.]
- 7 Schyndel R G van, Tirkel A Z, Osborne C F. A digital watermark [A]. In: IEEE Signal Processing Society 1994 International Conference on Image Processing (ICIP'94) [C], Austin, TX, USA, 1994, 2: 86 ~ 90.