

基于卷积码和软判决的图像水印盲检算法

陈 禧

(重庆大学 通信工程学院, 重庆 400030)

摘 要: 根据水印系统与通信系统的相似性, 借助通信中的卷积码和交织技术可提高盲水印算法的鲁棒性, 在 DCT 域设计并实现了一种适合软判决检测的盲数字水印算法。实验结果表明, 该算法对于常见的图像攻击具有很强的鲁棒性, 卷积码能有效地提高水印的鲁棒性, 同时软判决检测较硬判决检测能进一步提高水印的鲁棒性。

关键词: 数字水印 卷积码 盲检测 软判决

随着网络通信技术的迅猛发展, 数字媒体得到了广泛应用, 但数字产品极易被非法拷贝和分发。如何进行版权保护、确保信息安全便成为产权保护和认证的核心问题。为了解决数字内容的版权保护和信息安全问题, 20 世纪 90 年代出现了数字水印技术, 它通过在数字产品中嵌入版权标识(水印信息)确定数字产品的所有权或检验数字内容的原创性。数字图像水印技术作为一种版权保护的重要手段, 一直是研究的热点。

数字水印分为明文水印和盲水印。明文水印在检测过程中需要原始数据, 具有较强的鲁棒性, 但存储成本高, 实用性不强; 盲水印检测不需要原始数据, 存储成本低, 实用性强, 但其鲁棒性稍差。因此, 设计强鲁棒性的盲水印算法是水印技术发展的方向, 也是水印技术能否获得广泛应用的关键。

目前, 绝大多数盲水印检测算法是通过扩频调制技术完成的, 但这种方法将减少水印的嵌入容量。水印量化嵌入技术能在不减少水印嵌入容量的同时实现盲检测, 利用此项技术实现的方法其性能优于扩频调制技术实现的方法^[1]; 由于水印系统和通信系统具有相似性^[2], 通信中的信道编码技术可以用于增强盲水印算法的鲁棒性; 在对信道编码进行译码时, 一般来讲, 软判决译码性能优于硬判决译码性能, 而现有的各种水印盲检测算法提取出的是离散信息, 使得译码器难以进行软判决译码, 为了最大限度地发挥信道编码对水印鲁棒性的贡献, 亟待设计适合软判决译码的水印盲检测算法。因此, 本文利用卷积码提高水印的鲁棒性, 并基于水印量化嵌入技术在 DCT 域设计了一种适合软判决译码的盲水印算法, 同时给出仿真实验结果。

1 算法原理

本水印系统的框图如图 1 所示。

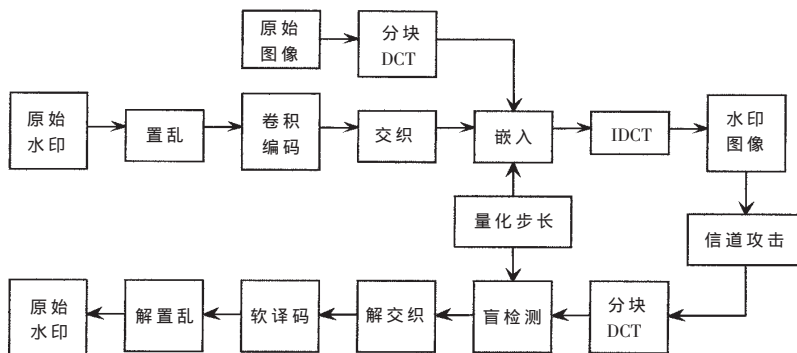


图 1 水印系统的结构框图

1.1 水印嵌入

设嵌入的水印为一幅二值图像标志, 水印的具体嵌入过程为:

第一步, 对水印图像采用二维的 Toral 自同构运算进行置乱。二维的 Toral 自同构运算可看作二维平面内的空域变换, 应用于图像置乱时, 通常采用如下公式表示^[3]:

$$\begin{pmatrix} x_{n+1} \\ y_{n+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ k & k+1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_n \\ y_n \end{pmatrix} \pmod{N} \quad (1)$$

式中, $(x_n, y_n) \in L = [0, N-1] \times [0, N-1] \subset Z^2$, 密钥 $k \in Z^+$, 图像的大小为 $N \times N$ 。

(1) 式的映射具有周期性, 周期与 k 和 N 的取值有关。通过取不同的 k 值和经过不同次数的 Toral 变换可以对水印图片进行 Toral 置乱, 实现对水印信息的加密, 同时还可以使水印受到攻击后的错误比特尽量分散, 减小错误比特造成的视觉影响。为了定量地分析置乱效果, 可以采用一阶置乱度 SH 来衡量^[4]。 SH 可表示成:

$$SH = E(D_1(i, j)) / Var(D_1(i, j)) \quad (2)$$

式中, $D_1(i, j) = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$, 表示图像矩阵中坐标为 (x_i, y_i) 的点 A 和与点 A 相距一个元素且坐标为 (x_j, y_j) 的点 B 之间的距离; $E(\cdot)$ 和 $Var(\cdot)$ 分别表示求均值和方差。 SH 的值越大, 表示原来完整的图像的像素被打散的

均匀程度越大,进而能更好地减小错误比特造成的视觉影响。在具体应用中应选择均值超过某一门限且置乱度达到最大时的变换次数为最佳变换次数。

第二步,对 Toral 置乱后的二值水印图像降维。为了降低水印检测的误码率,增强水印信息自身的纠错能力,从整体上提高水印算法的鲁棒性,对降维后的水印信息进行卷积编码。由于卷积码对随机错误有比较强的纠错能力,但对突发错误的纠错效果却不好,所以对卷积编码后的信号再进行随机交织处理,在不增加比特的情况下,能比较好地解决问题。假设交织后得到的水印信息为 $W=\{w_i, i=1,2,\dots,M, w_i \in \{0,1\}\}$ 。

第三步,对原始图像进行 8×8 的分块 DCT 变换,并按下述方法把水印信息 W 嵌入各块的直流系数中:

若 $w_i=0$ 且 $(d_i \bmod \Delta) \leq 3\Delta/4$ 则 $d_i' = d_i - (d_i \bmod \Delta) + \Delta/4$
 若 $w_i=0$ 且 $(d_i \bmod \Delta) > 3\Delta/4$ 则 $d_i' = d_i - (d_i \bmod \Delta) + 5\Delta/4$
 若 $w_i=1$ 且 $(d_i \bmod \Delta) \geq \Delta/4$ 则 $d_i' = d_i - (d_i \bmod \Delta) + 3\Delta/4$
 若 $w_i=1$ 且 $(d_i \bmod \Delta) < \Delta/4$ 且 $[d_i/\Delta] \neq 0$
 则 $d_i' = d_i - (d_i \bmod \Delta) - \Delta/4$
 若 $w_i=1$ 且 $(d_i \bmod \Delta) < \Delta/4$ 且 $[d_i/\Delta] = 0$
 则 $d_i' = d_i - (d_i \bmod \Delta) + 3\Delta/4$

式中, d_i 为第 i 个块的直流系数, \bmod 为模运算, $[\cdot]$ 为下取整, Δ 为量化步长。

水印嵌入后,当 $w_i=0$ 时, $d_i \bmod \Delta = \Delta/4$; 当 $w_i=1$ 时, $d_i' \bmod \Delta = 3\Delta/4$ 。量化步长 Δ 的选取是关键, Δ 越大鲁棒性越好,但原始图像的失真也越大; Δ 越小鲁棒性越差,但原始图像的失真也越小。在选取量化步长的时候,应该在保证不可见性的前提下,使 Δ 的取值尽可能的大。 Δ 可以作为密钥,在不知道 Δ 的情况下无法正确地提取出水印信息,进而增强了水印的安全性。

由于在不被人眼察觉的情况下, DCT 变换后直流系数的可改变量较交流系数的可改变量大得多^[5],即量化步长的取值可以更大,从而增强了算法的鲁棒性,并且直流系数本身具有很好的鲁棒性。因此此处选择直流系数作为水印的嵌入位置。

第四步,将更新后的各块进行二维 IDCT 变换,经过组合后便得到含水印图像。

1.2 水印盲检测

数字水印的提取是嵌入的逆过程,具体步骤如下:

第一步,对待检测图像进行 8×8 的分块 DCT 变换。
 第二步,按一般盲检测算法设计的检测算法如下:

$$w_i'' = \begin{cases} 0, & \text{if } (d_i'' \bmod \Delta) \leq \Delta/2 \\ 1, & \text{if } (d_i'' \bmod \Delta) > \Delta/2 \end{cases} \quad (3)$$

式中, d_i'' 为受到攻击后的待检测图像各块的直流系数, Δ 为与嵌入时一样的量化步长。

根据卷积码译码原理,当(3)式的输出送至 Viterbi 译码器译码时,

由于输入的信息是离散的,只能进行硬判决译码,但是软判决译码较硬判决译码有更好的纠错能力^[6],因此本文采用如下检测算法:

$$w_i'' = d_i'' \bmod \Delta \quad (4)$$

将(4)式的输出进行 $Q(Q>2)$ 电平量化和解交织后,送至 Viterbi 译码器进行软判决译码。对 w_i'' 进行 Q 电平量化时,量化区间按如下方法划分:将大于 $3\Delta/4$ 的区间和小于 $\Delta/4$ 的区间分别设为最高电平 $(Q-1)$ 和最低电平 (0) ,将处于 $\Delta/4$ 和 $3\Delta/4$ 之间的区间进行 $Q-2$ 电平的均匀量化。

第三步,将 Viterbi 软判决译码输出的一维信息升维,然后进行 Toral 反变换即可提取出水印信息。

1.3 水印的评价

由于提取的水印可能与原嵌入水印不完全一样,需要有一个评价标准来衡量恢复的水印与原始水印的相似程度,除了可从主观感觉上评价提取出的水印的质量外,还可采用归一化相似度 NC 客观地评判, NC 可表示为:

$$NC = \frac{\sum_i \sum_j w''(i,j) \times w(i,j)}{\sum_i \sum_j w(i,j)^2} \quad (5)$$

式中, $w''(i,j)$ 表示提取出的水印, $w(i,j)$ 表示原始嵌入的水印。

NC 值越接近 1,说明 $w''(i,j)$ 和 $w(i,j)$ 之间的差异越小;反之,则差异越大。

2 仿真结果及分析

为了验证本文所提出的水印算法的有效性,实验中宿主图像采用 $512 \times 512 \times 8$ 的“Lena”图像,水印图像采用 32×32 印有“重庆大学”字样的二值图像,分别如图 2(a)和图 2(b)所示,在 Matlab6.5 和 Windows Xp 平台上进行仿真实验。取量化步长 $\Delta=80$ 。在进行 Toral 变换时,取 $k=3$,采用的卷积码为 $(4,1,5)$,生成多项式用八进制表示为 $(53,67,71,75)$,量化参数 $Q=8$ 。为了使置乱达到最好的效果,对原始水印进行 12 次 Toral 变换,结果如图 2(c)所示。

2.1 透明性实验

采用本文算法对 Lena 图像嵌入水印后的 PSNR 值为 38.9dB,结果如图 2(d)所示,从主观上,几乎无法察觉嵌入水印前后宿主图像的变化,保证了水印的不可见性。图 2(e)为嵌有水印的图片在未受到攻击的情况下提取出来的二值水印图像, $NC=1$ 。

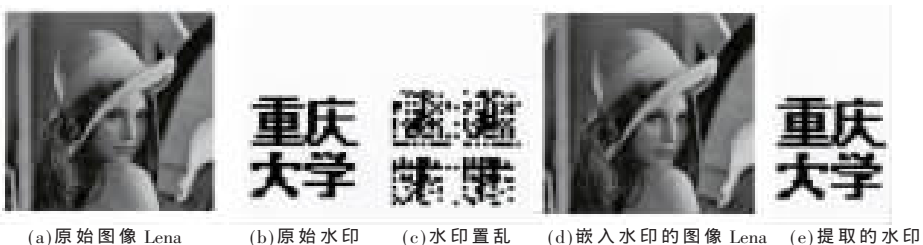


图 2 水印置乱前后及水印嵌入前后的比较

2.2 JPEG 压缩实验

对嵌有水印的图像进行 JPEG 压缩,当品质因子 $Q=15$ 时,嵌入水印的图像出现明显的方块效应,图像已经没有商业价值,但提取出的水印的 NC 值还高达 0.98752,说明该算法对 JPEG 压缩具有很强的抵抗能力。图 3(a)即为 $Q=15$ 时提取的水印图像。

2.3 叠加噪声实验

对嵌有水印的图像叠加均值为 0,方差 $\sigma^2=0.0035$ 的高斯噪声,宿主图像已经严重失真,此时 $NC=0.96949$,说明该算法对高斯噪声具有较好的抵抗能力,此时提取出的水印图像如图 3(b)所示。

对嵌有水印的图像叠加椒盐噪声,当受到椒盐噪声攻击的像素点占整幅图像像素点的比例 $D=1.3\%$ 时, $NC=0.98197$,能比较清晰地辨别出“重庆大学”几个字,此时提取的水印图像如图 3(c)所示。可见,该算法对椒盐噪声具有很好的鲁棒性。

2.4 滤波攻击实验

对嵌有水印的图像进行中值滤波,提取出的水印的 $NC=0.92381$,此时提取的水印图像如图 3(d)所示。

对嵌有水印的图像进行维纳滤波后提取的水印图像如图 3(e)所示,此时 $NC=1$ 。

2.5 剪切攻击

对嵌有水印的图片任意剪切掉 30%, NC 值均在 0.96 以上。从提取出的水印能辨别出“重庆大学”几个字。剪切掉宿主图像左上角 30%后提取出来的水印图像如图 3(f)所示。

2.6 对比性实验

为了验证卷积码能提高水印的鲁棒性以及软判决检测能进一步提高水印的鲁棒性,本文对水印嵌入前不加卷积编码和加卷积编码、用(3)式硬判决译码和用(4)式软判决译码三种情况做了如下对比性实验(实验参数相同),结果如表 1 所示。由于嵌入水印前是否进行卷积编码和交织对嵌入水印后图像视觉效果几乎没有影响如图 4 所示,所以可以不考虑两种方法对视觉效果的影响。

从表 1 可以看出,对水印进行卷积编码能增强水印的鲁棒性,而软判决译码检测又能进一步增强水印的鲁棒性,进而增强了水印算法的实用性。

本文根据水印系统与通信系统的相似性,运用通信信道编码中的卷积编码和交织技术来提高图像盲水印

表 1 水印有无卷积编码以及软硬判决检测对常见攻击的抵抗能力对比

方法 NC 攻击类型	无卷积编码	有卷积编码 硬判决检测	有卷积编码 软判决检测
JPEG 压缩($Q=15$)	0.51734	0.65881	0.98752
高斯噪声(均值为 0,方差为 0.0035)	0.81969	0.93897	0.96949
椒盐噪声($D=1.3\%$)	0.8405	0.95146	0.98197
5×5 中值滤波	0.93759	1	1
7×7 中值滤波	0.88904	0.92372	0.92381
5×5 维纳滤波	0.94313	1	1
7×7 维纳滤波	0.82524	0.77947	0.8405
损失 30% 水印信息	0.70874	0.95423	0.96394



图 4 有无卷积编码载体图像对比

算法的鲁棒性,并设计了一种适合软判决译码的盲水印算法。实验结果表明,对水印进行卷积编码能提高水印的鲁棒性,同时软判决译码也能进一步提高水印的鲁棒性,使得本算法对椒盐噪声、高斯噪声、压缩、滤波和剪切等常见的图像处理和噪声干扰具有很好的鲁棒性,尤其对剪切和 JPEG 压缩。因此,本算法具有较强的实用性。同时,本文所提出的软判决译码盲水印检测算法不仅适合软判决 Viterbi 译码,同时也适合其他信道编码的软判决译码,具有较强的通用性。

参考文献

- [1] CHEN B, WORNELL G W. Digital watermarking and information embedding using dither modulation[C]. IEEE Second Workshop on Multimedia Signal Processing, 1998: 273-278.
- [2] 隋爱芬,李智,姚慧民,等.数字水印系统的通信建模[J]. 军事通信技术, 2003, 24(3): 1-4.
- [3] VOYATZIS G, PITAS I. Applications of toral automorphisms in image watermarking[C]. International Conference on Image Processing, 1996: 237-240.
- [4] 张华熊,仇佩亮.置乱技术在数字水印中的应用[J]. 电路与系统学报, 2001, 6(3): 32-36.
- [5] 黄继武, SHI YUN Q, 程卫东. DCT 域图象水印: 嵌入对策和算法[J]. 电子学报, 2000, (4): 57-60.
- [6] 王新梅,肖国镇. 纠错码——原理与方法[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2001.

(收稿日期: 2006-07-17)



图 3 受到攻击后提取出来的水印图像