

一种新的标识符水印算法¹

钟 桦 焦李成 刘 芳

(西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室 西安 710071)

摘 要 大部分水印算法都是用一个伪随机序列作为水印,检测时根据序列的相关性来判断水印的存在与否.该文提出了一种新的标识符(ID)水印算法,具有误码纠错,水印高度冗余和自适应水印恢复三个特点.

实验结果证明了该算法的有效性和可行性.

关键词 版权保护, 水印, 伪随机序列, 标识符码, 纠错, 冗余, 自适应水印恢复

中图分类号 TN911.73, TP391.4

1 引言

电子数据特别是图像在因特网上得到了极为方便的传播,如何维护电子数据版权这一需求使得水印技术研究领域在近几年变得活跃起来.水印应该满足两个基本要求,即不可感知性和稳定性.不可感知性也即水印的透明性,它是指水印嵌入过程不能带来任何可感知的人造物;稳定性则是指水印数据在经历通常的数据处理甚至蓄意的攻击后,仍然能够稳定地被检测或恢复.

相对于伪随机序列来说,标识符表示更具有说明性.但是标识符唯一确定一个对象,因此不允许出现比特误码,与密码术(steganography)^[1,2]相比,要求更大的稳定性.本文非常有效地解决了这一问题.本文算法特点是,除了小波域水印固有的多分辨特性,安全性和不可感知性以外,它具有 3 个突出特点:误码纠错;水印高度冗余;自适应于失真的水印恢复策略.实验结果表明该算法的有效性和可行性.

2 水印信道模型

水印技术中很重要的一个问题是水印嵌入进行建模.根据水印问题与通信的类似性,图像可以看作是一个噪声信道,而把水印看作要传输的信号.水印信号的功率相对于图像信号来说应该很小,以保证图像信号的保真度要求.这样水印就类似于高信噪比下的信号传输和检测过程.在文献[3,4]中提出了一种水印算法,该算法把一幅图像分成 N 个成分,

$$C^{(k)} = [c_1^{(k)}, c_2^{(k)}, \dots, c_n^{(k)}], \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

式中 n 表示每一成分的长度.这些成分可以是 DCT 系数块,也可以是小波子带系数的集合.水印的嵌入过程可以描述如下:

$$W^{(k)} = [c_1^{(k)} + p_1^{(k)} w_1^{(k)}, \dots, c_n^{(k)} + p_n^{(k)} w_n^{(k)}], \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

其中 $W^{(k)} = [w_1^{(k)}, \dots, w_n^{(k)}]$ 是嵌入的水印, $p_i^{(k)}$ 表示 $c_i^{(k)}$ 可以容许的最大噪声偏差.

水印的恢复过程如下:

$$\hat{W}^{(k)} = \left[\frac{\hat{c}_1^{(k)} - c_1^{(k)}}{p_1^{(k)}}, \dots, \frac{\hat{c}_n^{(k)} - c_n^{(k)}}{p_n^{(k)}} \right], \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

¹ 2000-12-27 收到, 2001-06-08 定稿
国家自然科学基金(60073053)和国家“863”计划资助项目

由上可以看出, 每一个 $C^{(k)}$ 可以看作一个多比特的存储器。这样整幅图像就可以看作一个 $N \times n$ 存储阵列。假设嵌入的水印 $W^{(k)} \sim N(0, I)$, 噪声干扰 $J^{(k)} \sim N(0, \sigma^2 I)$, 其中 I 是单位协方差阵, $\sigma^2 I$ 是噪声干扰的协方差阵, 则图像总的存储量, 即水印容量由以下公式给出:

$$C(\sigma) = \frac{Nn}{2} \log\left(1 + \frac{1}{\sigma^2}\right) \quad (4)$$

可以看出, 水印容量与图像大小和噪声干扰方差有关。在图像大小确定的情况下, 必须通过减小噪声干扰提高算法性能来增大水印容量。

3 标识符水印算法

3.1 冗余度设计 标识符水印需要准确地恢复出每一个比特值, 所以必须尽可能地降低误码率到纠错码的纠错能力之内。为使误码率足够低, 本文考虑利用嵌入很高冗余度的水印序列, 从而抵消随机噪声的影响。

在文献 [2] 和 [4] 中以两个随机序列 $s^b = [s_1^b, s_2^b, \dots, s_n^b]$, $b = 0, 1$ 来代表比特值“0”和“1”。这两个序列必须: (1) 序列之间距离较大; (2) 序列长度 n 足够大。但是序列越长, 则冗余度越低, 检测时的相似度也会降低, 导致误判概率增大; 另一方面较长的序列还意味着图像所能存储的比特数减少。因此本文直接把编码后的标识符作为水印序列嵌入。

3.2 误码纠错 冗余度设计主要是控制误码率在纠错码的纠错范围之内, 从而可以准确地恢复每一个比特值。纠错码在通信中使用的非常广泛。一般来说, 我们希望纠错码的纠错能力越强越好, 在水印中也是一样。但是在图像中纠错码的应用要受到一定的限制。首先我们要考虑编码长度问题。假设以一个二值序列 $w = \{w(i), i = 1, 2, \dots, N\}$ 作为标识符, 其长度 N 应该满足应用的需要, 纠错编码后得到的一定码长的序列即是水印序列, 其信息位即为我们所嵌入的标识符。如上所述, 图像的容量是有限的, 为了得到较高的相似度输出, 我们必须在水印序列长度和冗余度之间选取一个最佳的折衷方案。另外, 水印序列的误码率应该不超过纠错码的纠错能力, 因此要综合考虑标识符长度, 水印序列长度以及纠错码类型。

3.3 水印嵌入 标识符水印的嵌入算法如图 1 所示。通过在小波域中嵌入水印, 从而得到具有多分辨特性的水印, 提高了水印的稳定性 [3]。

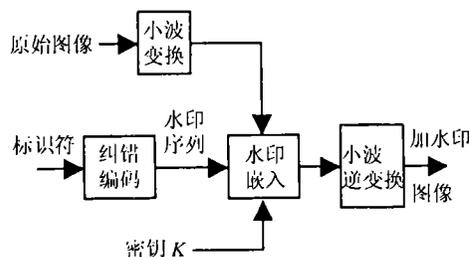


图 1 水印嵌入过程框图

为保证水印具有最大能量且不可感知, 本文利用了人类视觉模型中的 JND(临界可见失真)门限 [3-5], 当嵌入水印的能量超过这一门限时, 图像就会出现可察觉的失真。文献 [5] 中的 JND 门限只是一种很简单的视觉模型, 其每一系数块 JND 值固定, 这显然是可以根据人类视觉模型进一步改进的。因此在这里采用了一种双阈值策略, 如下所示

$$x^w = \begin{cases} x + \text{JND}_{l,f} \cdot w_i, & |x| > \text{JND}_{l,f} \\ x + T \cdot w_i, & |x| > T \\ x, & \text{其它} \end{cases} \quad (5)$$

其中 $JND_{l,f}$ 是相应系数块的临界可见失真门限。 $T < JND_{l,f}$ ，其目的是增大冗余度以提高水印稳定性。 T 不能太小以防止过小系数产生的负面影响。

通过分析，小波分解的逼近系数具有的幅值远大于图像细节系数。虽然对逼近系数的修改容易给图像带来失真，但是在图像失真范围之内对逼近系数的修改幅度却是最大的。换句话说，逼近系数具有最大的感知容量^[6]，也可用于水印嵌入。

标识符水印的嵌入算法细节如下：

- (1) 对标识符序列进行纠错编码得到水印序列 $\{w_i\}$ 。
- (2) 对图像 X 进行 L 层小波变换得到小波系数 $X_{l,f}(m,n)$ ，其中 $f = 0, 1, 2, 3$ ，分别表示小波系数的逼近系数及水平、垂直和对角三个频率方向； $l = 1, 2, \dots, L$ ，分别表示小波分解的各分辨率。这里取 $L = 4$ 。对系数块 $X_{l,f}$ 进行修改：
 - (a) 逐行确定将要修改的系数集合 $A_{l,f}$ 。如果 $X_{l,f}(m,n) > T$ ，则系数 $X_{l,f}(m,n) \in A_{l,f}$ ，假设 $A_{l,f}$ 中共有 $M_{l,f}$ 个系数；
 - (b) 利用密钥 K 对集合 $A_{l,f}$ 进行伪随机排序^[7]，得到集合 $B_{l,f}$ ；
 - (c) 根据 (6) 式修改集合 $B_{l,f}$ 中的系数。
- (3) 对所有的小波系数块重复以上操作。
- (4) 对修改过的图像小波系数进行小波逆变换，得到加水印图像 X^w 。

3.4 水印恢复

3.4.1 水印序列提取 水印恢复过程框图如图 2 所示。假设某系数块中每个比特重复嵌入 CR 次，即码片率 (Chip Rate)，根据密钥 K 可以提取 CR 个水印序列 $\{w_{i,k}^*, i = 1, \dots, N; k = 1, \dots, CR\}$ 。最终的水印序列为

$$\sum_{k=1}^{CR} w_{i,k}^* = \sum_{k=1}^{CR} (w_{i,k} + N_{i,k}) = \sum_{k=1}^{CR} w_{i,k} + \sum_{k=1}^{CR} N_{i,k} \quad (i = 1, \dots, N) \quad (6)$$

其中 $N_{i,k}$ 表示噪声。当 CR 足够大时，(6) 式中的水印分量可稳定叠加，而噪声分量则是随机抵消，从而保持了水印序列比特值的极性。对整幅图像即可得到多个水印序列

$$W_{l,f}^* = \{w_i^*, i = 1, \dots, N\} \quad (7)$$

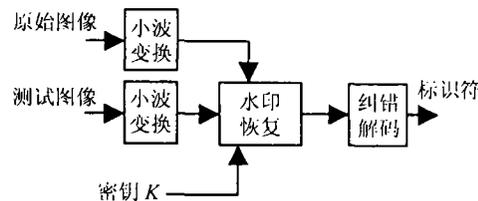


图 2 水印恢复过程框图

3.4.2 自适应水印恢复策略 众所周知，各种失真对图像的破坏程度是不一样的。加性白高斯噪声、JPEG 压缩和裁剪对图像全局水印影响较强，但是局部水印保存的较好；对于其它的一些失真如图像缩放和中值滤波等，破坏局部水印的程度要远大于全局水印。显然水印提取应该避开失真较大的水印。本文的水印恢复算法在策略上是自适应于失真类型的，具体是：分别列出各个系数块以及整幅图像中水印序列的平均值，选取相似度最大的作为恢复的水印序列，相似度函数定义如下：

$$\rho(W, W^*) = \frac{W \cdot W^{*T}}{\sqrt{W \cdot W^T} \sqrt{W^* \cdot W^{*T}}} \quad (8)$$

对该水印序列进行纠错解码即可得到嵌入的标识符。

4 实验结果

实验中选取典型的 $256 \times 256 \times 8$ 的灰度图像 Lena。随机取一长度为 30 的二值序列作为标识符, 这一大小已经能够满足大多数需要。BCH 码对标识符进行纠错编码后得到的水印序列长度为 63, 纠错能力为 6 个误码。原始图像和水印图像分别如图 3(a) 和图 3(b) 所示。表 1 给出了水印序列在各层各个方向嵌入的码片率以及总数。可以看出, 如此高的冗余度并没有影响加水印图像的感知质量。嵌入的水印具有很高的冗余度, 这无疑是有利于标识符水印复的。

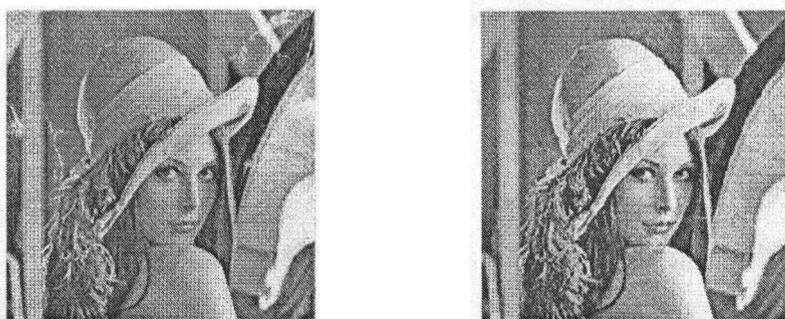


图 3 水印的不可感知性效果

当恢复的水印序列误码达到 6 个时, 将显示为无法恢复。表 2、表 3 和表 4 分别列出了标识符水印在加性白高斯噪声、JPEG 压缩和裁剪 3 种失真下的恢复性能。可见, 当信噪比低达 5dB, Q 达到 5 以及仅保留 0.5% 的图像面积时均能得到标识符的无误码恢复。

表 1 水印序列码片率 (CR)

分辨层	$l=1$				$l=2$			$l=2$			$l=4$		
频率方向	$f=0$	$f=1$	$f=2$	$f=3$									
码片率 CR	4	3	3	3	13	11	9	35	22	21	61	37	32
各层水印总数	13				33			78			130		

表 2 加性白高斯噪声

信噪比 (dB)	0	5	10	15	20	25	30
水印序列误码个数	12	2	0	0	0	0	0
纠错后标识符误码个数	无法恢复	0	0	0	0	0	0

表 3 JPEG 压缩

质量因子 Q	5	10	20	30	40	50	60	70	80
水印序列误码个数	6	0	0	0	0	0	0	0	0
纠错后标识符误码个数	0	0	0	0	0	0	0	0	0

表 4 裁剪

保留部分	0.1%	0.2%	0.5%	1%	10%	30%	50%
水印序列误码个数	19	10	1	0	0	0	0
纠错后标识符误码个数	无法恢复	无法恢复	0	0	0	0	0

对于缩放 (图像缩小 $1/2$) 和中值滤波 (3×3), 恢复的标识符均无误码。由此所提出的标识符水印算法的高度稳定性。

5 结 论

本文提出了一种新颖的标识符水印嵌入算法, 除了小波域水印固有的多分辨特性, 安全性和不可感知性等特点外, 它还具有误码纠错功能; 水印序列具有极大的冗余度; 自适应水印恢复策略等特点, 从而成功地实现了标识符水印的安全性、稳定性和不可感知性。该算法能够在信噪比低达 5dB 和 JPEG 质量因子低达 $Q = 5$ 时仍能完全恢复嵌入的标识符。在裁剪仅保留 0.5%, 3×3 的中值滤波, 缩放 (图像缩小 $1/2$) 分别也都能完全恢复标识符的所有比特值。

参 考 文 献

- [1] F. Hartung, M. Kutter, Multimedia watermarking techniques, Proc. IEEE, 1999, 87(7), 1079–1107.
- [2] L. M. Marvel, C. G. Bonchelet, C. T. Retter, Spread spectrum image steganography, IEEE Trans. on Image Processing, 1999, 8(8), 1075–1083.
- [3] C. I. Podilchuk, W. Zeng, Image-adaptive watermarking using visual models, IEEE Journal on selected areas in communication, 1998, 16(4), 525–539.
- [4] S. Servetto, C. I. Podilchuk, K. Ramchandran, Capacity issues in digital image watermarking. B. Proceeding of the 1998 International Conference on Image Processing, Chicago, 1998, 1, 445–449.
- [5] A. B. Watson, G. Y. Yang, J. A. Solomon, J. Villasenor, Visibility of wavelet quantization noise, IEEE Trans. on Image Processing, 1997, 6(8), 1164–1175.
- [6] 黄继武, Yun Q. SHI, 程卫东, DCT 域图像水印, 嵌入对策和算法, 电子学报, 2000, 28(4), 57–60.
- [7] C. T. Hsu, J. L. Wu, Hiding digital watermarks in image, IEEE Trans. on Image Processing, 1999, 8(1), 58–68.

A NEW ID WATERMARKING ALGORITHM

Zhong Hua Jiao Licheng Liu Fang

(Key Lab for Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract Most algorithms use pseudorandom sequences as watermarks, whose presence are determined according to its correlation with original sequence. In this paper an identifier (ID) watermarking algorithm is proposed, which has the characteristics of error-correct, high redundancy and adaptive watermark retrieval. Experimental results demonstrate that it is effective and feasible.

Key words Copyright protection, Watermarking, Pseudorandom sequence, ID, Error-correct, Redundance, Adaptive watermark retrieval

钟 桦: 男, 1976 年生, 博士生, 主要研究领域为智能信息处理, 信息隐藏, 数字水印.

焦李成: 男, 1959 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为智能信息处理, 非线性理论, 数字水印.

刘 芳: 女, 1963 年生, 副教授, 主要研究领域为智能信息处理, 模式识别, 电子商务.