

# 基于混沌序列的 DCT域数字水印算法\*

## The Digital Watermarking Algorithm Based on DCT and Chaotic Sequences

李淑明<sup>1</sup>, 覃团发<sup>1</sup>, 刘贤锋<sup>2</sup>

Li Shuming<sup>1</sup>, Qin Tuanfa<sup>1</sup>, Liu Xianfeng<sup>2</sup>

(1. 广西大学计算机与电子信息学院, 广西南宁 530004; 2. 桂林电子工业学院管理系, 广西桂林 541004)

(1. Coll. of Comp. & Elec. Info., Guangxi Univ., Nanning, Guangxi, 530004, China; 2. Dept. of Mana., Guilin Univ. of Elec. Tech., Guilin, Guangxi, 541004, China)

**摘要:** 采用混沌动力系统中 Logistic映射数字水印的产生方式和 Cox's 扩频水印的嵌入方案, 提出基于混沌序列的 DCT域数字水印算法. 该算法将数字灰度图像进行 DCT变换以及把混沌序列添加到数字图像的 DCT的交流系数中, 从而获得数字水印图像. 对所得的数字水印图像进行添加噪声、JPEG有损压缩, 以及低通滤波等处理, 结果表明: 基于混沌序列的 DCT域数字水印算法所获得的水印对常见的图像攻击具有较好的稳健性.

**关键词:** 数字水印 混沌序列 离散余弦变换 逆离散余弦变换 算法

中图分类号: TN918.4 文献标识码: A 文章编号: 1005-9164(2005)02-0111-04

**Abstract** A novel watermarking algorithm based on DCT and chaotic sequences is proposed in this paper by combining the Logistic map of chaotic dynamics and the scheme of Cox's spread spectrum watermarking to produce watermarking image. The chaotic sequences are embedded to the AC coefficients of DCT. Experimental results demonstrate that the watermarking is better in againsting common image lossy copression, filtering and noise et al.

**Key words** digital watermarking, chaotic sequences, discrete cosine transform, inverse discrete cosine transform, algorithm

近年来,随着计算机网络和通信技术的不断提高,数字媒体在互联网得到了飞速发展.然而,数字作品的便利性与不安全性并存,由于它可以被低成本和高速率地复制和传播,这成为了数字媒体的不安全因素.因而,如何采取多种手段对数字作品进行保护已迫在眉睫.数字水印技术正是在这种背景下应运而生,并成为信息隐藏技术研究领域的一个重要分支.数字水印的不可见性和稳健性<sup>[1]</sup>是水印算法中最重要的两个问题,二者的关系是相互依存但又相互矛盾.

法律上判别数字水印加入时间问题的途径之一是采用数字时间戳<sup>[2]</sup>(Digital Time Stamps,简称

DTS),它为电子文件发表时间所提供的安全保护和证明. DTS是网上安全服务项目,由专门的机构提供,该机构是一个可信赖的第三方.采用数字时间戳时,通常在把加有水印的图像通过数字媒体公开发行前,先将需要加时间戳的图像文件用 HASH编码加密形成摘要,然后将这个摘要发送到 DTS机构, DTS机构在加入了收到文摘的日期和时间信息后,再对这个文件加密(数字签名),然后送回.当发生所有权纠纷时,即可通过本文提出的算法获得的水印和 DTS的数字时间戳,解决所有权问题.

本文基于混沌技术,提出一种基于混沌序列离散余弦变换(Discrete Cosine Transform,简称 DCT)域数字图像水印算法,该算法有效地解决了数字水印不可见性和稳健性<sup>[1]</sup>的问题.

### 1 混沌序列

混沌现象是非线性动力系统中出现的确定性的,

收稿日期: 2004-09-15

修回日期: 2004-10-25

作者简介: 李淑明(1973-),女,江西九江人,硕士研究生,主要从事数字图像处理的研究.

\* 国家自然科学基金(10147201)和广西高校百名中青年学科带头人(桂教人[2002]467号)资助项目.

类似随机的过程.利用其对初值的敏感依赖性,可以提供数量众多、非相关、类似随机而又确定可再生的信号.因此,利用混沌序列作为水印信号,具有易于生成数量极多,以及对初始条件敏感的优势,将混沌序列的初始值作为嵌入和检测提取信号的密钥,不仅简单实用而且有效.

Logistic映射的定义<sup>[2,3]</sup>:

$$x_{k+1} = 1 - \lambda x_k^2, \quad (1)$$

其中  $\lambda \in [0, 2]$ .在  $\lambda = 2$  的满射条件下, Logistic映射和 Chebyshev 映射是拓扑共轭的,即它们可被视为动力状态相同的系统,其生成序列的概率密度函数 pdf 相同:

$$d(x) = \begin{cases} \frac{1}{c} \frac{1}{1-x^2}, & -1 < x < 1, \\ 0, & \text{else.} \end{cases} \quad (2)$$

Logistic映射产生混沌序列的 2 个重要性质.

性质 1 对于任意初值产生的混沌序列,其均值为:

$$\bar{x} = \int_{-1}^1 x d(x) dx = 0. \quad (3)$$

性质 2 独立选取 2 个初始值  $x_0$  和  $y_0$ ,则产生的互相关函数为:

$$R(x_0, y_0) = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 d(x) d(y) (x - \bar{x})(y - \bar{y}) dx dy = W(x_0 - y_0). \quad (4)$$

Logistic 序列的 2 个性质表明,由于混沌动力系统有确定性,其统计特性等同于白噪声,因而被应用于数字通信和多媒体数据安全等领域的噪声调制.

混沌的存在不仅与系统的非线性特性(非线性方程的形式)有关,而且还与方程中的参数数值有关.因此混沌的存在往往与非线性系统的分岔相联系.由于排斥和折叠,在混沌中,系统的运动往往对初始条件非常敏感,初始条件的微小差别,要引起迭代(映射)的过程的巨大差异.因而利用混沌序列作为水印信号显得简单易行、安全可靠.由于对初始条件的敏感性,本文采用的 Logistic 混沌序列会由于不同的初始值将产生不同的混沌序列.因(4)式的  $x_0, y_0$  是互相独立的,因而互相关函数为 0,即:

$$R(x_0, y_0) = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 d(x) d(y) (x - \bar{x})(y - \bar{y}) dx dy = W(x_0 - y_0) = 0. \quad (5)$$

对于(1)式,当  $\lambda = 2, x_k \in (-1, 1)$  时, Logistic 是满映射,即  $x_{k+1} = 1 - 2^* x_k^2$  是一种典型的混沌映射.本文利用  $x_{k+1} = 1 - 2^* x_k^2$  来产生混沌水印序列<sup>[4]</sup>.

## 2 数字水印的实现

水印嵌入公式<sup>[5]</sup>如下:

$$v_i' = v_i + T^* x_i; \quad (6)$$

$$v_i' = v_i (1 + T^* x_i); \quad (7)$$

$$v_i' = v_i (e^{T^* x_i}). \quad (8)$$

本文选择(7)式作为水印嵌入方式,其中  $v_i$  是原始图像 DCT 变换的系数;  $v_i'$  是嵌入水印后经 DCT 变换的系数;  $T$  是嵌入强度因子.

### 2.1 水印嵌入和提取检测

图 1 是混沌水印嵌入原理框图.先把原始公开图像进行 DCT 变换,然后按照水印嵌入算法将混沌水印序列加到 DCT 系数上,再经逆离散余弦变换(IDCT),即可获得嵌有水印的图像.图 2 是混沌水印的提取与检测原理框图.先把原始公开图像和嵌有水印的图像分别进行 DCT 变换,然后根据水印提取算法,提取水印,利用提取的水印序列和原始的水印序列计算它们的相似程度,并依此来判断水印是否存在.

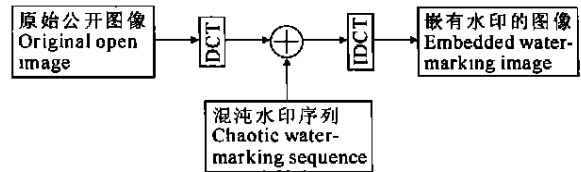


图 1 混沌水印嵌入原理

Fig. 1 Block diagram of embedded chaotic sequence principle

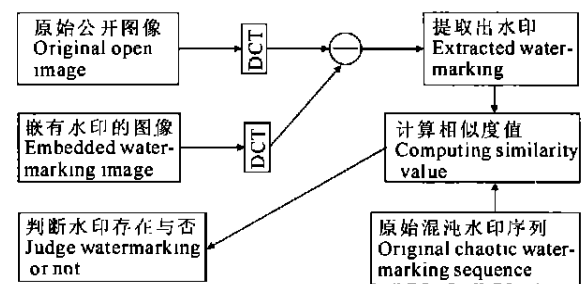


图 2 混沌水印的提取与检测原理

Fig. 2 Block diagram of extracted and detected chaotic watermarking principle

### 2.2 水印的嵌入算法

步骤 1 利用  $x_{k+1} = 1 - 2^* x_k^2$  产生  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_N$  个混沌序列,本文取  $N = 2000$ ;

步骤 2 把原始公开图像进行 DCT 变换,对 DCT 系数变成列向量,然后对列向量进行 sort 排序,选取 2000 个最大的 DCT 系数(直流 DC 系数除外),按照(7)式对 DCT 系数作如下的处理:

$$v_i' = v_i (1 + T^* x_i); \quad (9)$$

步骤 3 对嵌有水印的 DCT 系数矩阵进行 IDCT

变换,得到嵌有水印的图像.

### 2.3 水印的提取和检测

由于本文提出的算法不是盲水印算法,所以在对水印进行提取检测时需要原始公开图像和原始混沌水印序列.水印的提取与检测算法如下:

步骤 1 把嵌有水印的图像和原始公开图像分别进行 DCT变换;

步骤 2 对原始公开图像进行 sort 排序,找出原始公开图像的 2000个最大值(直流 DC系数除外),并按照下面方式进行水印的提取:

$$x_i'' = \frac{v_i' - v_i}{v_i' * T}, \quad (10)$$

其中,  $v_i''$  是嵌有水印图像经 DCT变换的系数;  $v_i'$  是原始公开图像经 DCT变换的系数;  $x_i''$  是提取的混沌水印序列;  $T$  是嵌入强度因子.

步骤 3 计算原始混沌水印与提取出的混沌水印的相似程度<sup>[5]</sup>,公式如下:

$$Sim(X, X'') = \frac{X'^* X''}{(X'')^* X''} = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} x_i' \cdot x_i''}{\sum_{i=0}^{N-1} (x_i'')^2}, \quad (11)$$

其中,  $X$  是原始混沌序列矩阵;  $X'$  是矩阵  $X$  的转置;  $X''$  是提取的水印矩阵;  $(X'')$  提取水印矩阵的转置;  $*$  是矩阵乘法;  $x_i'$  是混沌序列矩阵  $X$  中的元素 ( $i = 0 \dots N - 1$ );  $x_i''$  是混沌序列矩阵  $X'$  的元素 ( $i = 0, \dots, N - 1$ ).

步骤 4 设置 1 个阈值 (Threshold)  $T$ ,当阈值大于等于  $Sim(X, X'')$  时,就能证明测试图像中水印存在,反之就能证明水印不存在.

## 3 实验结果与分析

为了测试算法的性能,本文产生了 2000 个混沌序列来检测水印检测器对被测试图像的响应,测试图像为 256 像素  $\times$  256 像素的 Girl 的图像.混沌序列的初始值设为 0.01,本文水印嵌入强度因子  $T$  的选取是从人类视觉系统<sup>[6]</sup>(HVS)特性上来考虑的,它决定水印的嵌入深度,  $T$  越大嵌入的水印越深,水印的鲁棒性越好,可见性越差,即水印图像有明显的失真,产生块效应,失去使用价值.如果嵌入强度因子  $T$  过小,虽然此时嵌有水印的图像和原始公开图像相似度非常高,但水印的鲁棒性很差,在经历一些图像处理时容易被去掉,故  $T$  取值为 0.15.阈值 (Threshold)  $T$  的选取要同时考虑虚警错误<sup>[5,6]</sup>和漏警错误<sup>[5,6]</sup>,  $T$  减小,漏警错误降低而虚警错误提高;  $T$  增大,则虚警错误降低而漏警错误提高,本文中结合以上考虑  $T$  取值为 8.

图 3 是原始图像,图 4a 是嵌有混沌序列水印的图像.从视觉上来看,原始图像和嵌有水印的图像几乎是区分不开的,也即本文的水印具有很好信息隐藏效果.图 4b 是检测器对 2000 个随机产生水印的响应,  $X$  轴为水印序列,  $Y$  轴为检测器的输出响应,其中处为嵌入水印序列,峰值为 31.364.其它处的检测响应很小,此时值大于阈值 (Threshold),即能证明被测试的图像中嵌有水印,同时也说明混沌序列具有非常好的相关性能.从提取水印的试验中可以看出,在没有正确混沌系统的初始值的情况下,即使是用相同的映射也不能提取水印,这证实了混沌序列对初始值的敏感性.从而也说明本文的算法具有很好的安全性能.



图3 原始图像

Fig.3 Original image

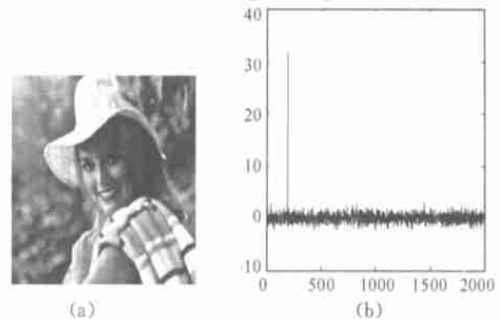


图4 嵌有水印图像和检测器响应 ( $Sim = 31.364$ )

Fig.4 Embedding watermarking image and detector response  $Sim = 31.364$

(a)嵌有水印图像;(b)检测器响应

(a)Embedding watermarking image;(b)Detector response

图 5a 和图 5b 证实了水印抵抗噪声的能力.从图 5a 和图 5b 可以看出,尽管含有水印的图像遭到了加性高斯噪声的干扰,但图像的质量没有明显下降,检测器的响应依然很强.这说明混沌序列的水印具有抗噪性能.

图 6 和图 7 是对嵌有水印的图像进行 JPEG 压缩的测试结果.图 6a 和图 7a 虽然分别经过了 15% 和 50% 的 JPEG 的压缩,但图像的效果依然很清晰,且检测器的输出值还达到了 16.031 和 28.701,可见本文的算法的抗 JPEG 压缩性能很好,说明水印的稳健性较好.

图 8a 和图 8b 是对水印图像进行  $5 \times 5$  均值滤波测试的结果.图 8 的图像质量虽然有点下降,但是检测器的输出仍为 9.0348,还是能检测出水印,证明水

印具有比较好的稳健性.本文算法的抗攻击的性能与黄继武等<sup>[7]</sup>提出的一种自适应图像水印算法相比,本文算法中抗噪声和抗 JPEG 压缩的性能较好.文献[7]中的抗噪声和 JPEG 压缩的检测响应不到 15,而本文算法抗噪声抗 15% 和 50% 的 JPEG 压缩的检测响应分别是 29.624 16.031 和 28.701,证实了本文算法具有

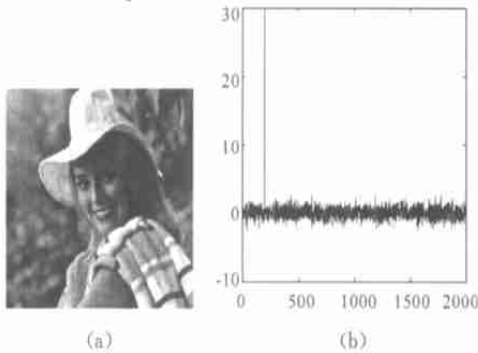


图5 加入 Gaussian 噪声的图像和检测器响应

Fig.5 Image of adding Gaussian noises and detector response

(a)加入 Gaussian 噪声;(b)检测器响应。(a)Image of adding Gaussian noises;(b)Detector response

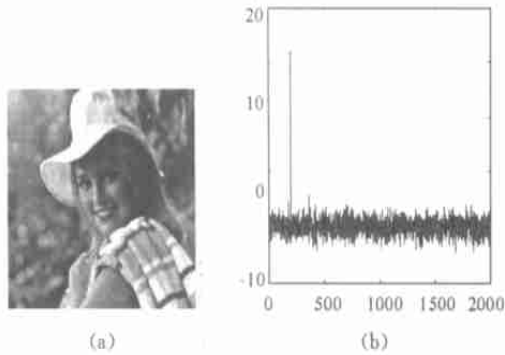


图6 15%JPEG 的压缩图像和检测器响应

Fig.6 Image of 15% JPEG compression and detector response

(a)15%JPEG 的压缩图像;(b)检测器响应。(a)Image of 15% JPEG compression;(b)Detector response

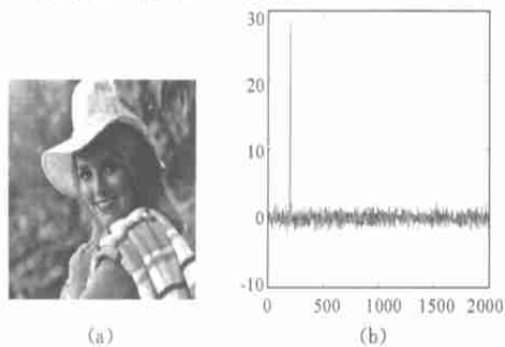


图7 50%的 JPEG 的压缩图像和检测器响应

Fig.7 Image of 50%JPEG compression and detector response

(a)50%JPEG 的压缩图像;(b)检测器响应。(a)Image of 50% JPEG compression;(b)Detector response

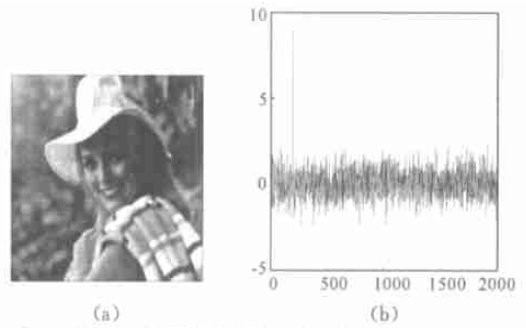


图8 均值滤波的图像和均值滤波响应 ( $Sim = 9.0348$ )

Fig.8 Detector response of average filtering  $Sim = 9.0348$

(a)均值滤波的图像;(b)检测器响应。(a)Average filtering image;(b)Detector response

较好的抗攻击能力,说明其具有较好稳健性.

综合上面的分析,说明本文算法具有良好的抵抗攻击的能力,特别是对噪声、JPEG 有损压缩,以及均值滤波均具有很好的抵抗性,均可检测出嵌入的混沌序列水印.

## 4 结束语

本文基于混沌序列提出了 DCT 域数字水印算法,该算法将混沌序列作为水印嵌入到数字图像 DCT 系数的交流分量上,但由于该算法是采用混沌序列作为水印,它的初始值就相当于一把密钥,当初始值稍有微小的不同时,所产生混沌序列就截然不同.例如,初始值不正确就不能产生正确的混沌水印序列,这就使得水印产品的安全性得到了较大的提高.加入 Gaussian 噪声、JPEG 压缩、均值滤波等大量的试验证明,该算法具有较好的不可见性和稳健性.

参考文献:

- [1] Hartung F, Kutter M. Multimedia watermarking techniques [J]. Proc IEEE, 1999, 87(7): 1079-1107.
- [2] 王炳锡,陈琦,邓峰森.数字水印技术[M].西安:西安电子科技大学出版社,2003.
- [3] 刘秉正.非线性动力学与混沌基础[M].长春:东北师范大学出版社,1994.
- [4] 武拴虎,谈正.基于混沌序列的视频图像数字水印隐藏与多分辨检测[J].西安交通大学学报,2000,34(6): 35-39.
- [5] Cox IJ, Kilian J, Leighton FT, et al. Secure spread spectrum watermarking for multimedia [J]. IEEE Trans On Image processing, 1997, 6(12): 1673-1687.
- [6] Ingemar J Cox, Mathew L Miller, Jeffrey A Bloom. 数字水印[M].王颖,黄志蓓等译.北京:电子工业出版社.
- [7] 黄继武, SH I, Yun Q. 一种自适应图像水印算法[J].自动化学报,1999,25(4): 476-482.

(责任编辑:黎贞崇)