

DCT 域下采样视频水印技术

杜耀刚^{1,2}, 蔡安妮², 孙景鳌²

(1. 北京电子科技学院基础部, 北京 100070; 2. 北京邮电大学电信工程学院, 北京 100876)

摘要: 根据 DCT 域 Watson 模型提出了一种抵抗下采样攻击的不可感知水印模型。用 DCT 域准卷积下采样方法得到图像的下采样版本, 利用亮度特征和图像感知失真限制自适应确定被嵌入水印序列的区域、长度和强度, 使上采样水印图像具有良好的视觉效果和鲁棒性。实验结果表明该算法对噪声干扰及视频下采样具有较好的鲁棒性, 而且不使用原始图像, 就可进行水印的相关检测。

关键词: DCT 域下采样; 视频水印; 不可感知模型; 自适应嵌入; 相关检测

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2005) 12-2219-03

DCT-based Video Watermarking Technique Using Downsampling

DU Yao-gang^{1,2}, CAI An-ni², SUN Jing-ao²

(1. Department of Foundation, Beijing Institute of Electronic Science and Technology, Beijing 100070, China;

2. Telecommunication Engineering School, Beijing University of Posts & Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: DCT-based Watson's imperceptible watermarking model resisted downsampling attack is presented. The downsampling image is obtained by quasi-convoluted downsampling and the region, the length and the strength of watermark sequence is adaptively embedded in the downsampling image by exploiting the luminance characteristic and a perceptual distortion constraint, which greatly improves the perceptual quality and robustness of up-sampling watermarked image. Simulation results show that the proposed method can achieve a better robustness to the white noise and video downsampling and the original image is not required for watermark detection.

Key words: DCT based downsampling, video watermarking, imperceptible model, insertion adaptive, correlation detection.

1 引言

随着网络化、信息化的发展, 数字视频技术的应用越来越广泛, 对数字产品的版权保护迫在眉睫。版权保护主要有两种方法: 一是用加密算法, 其缺点是解密后的数据不再受到保护; 二是用数字水印方案。“数字水印”是一种隐藏在数字化图像、视频和音频等多媒体中的版权信息, 其主要特点是不可感知性、安全性和鲁棒性。

视频水印是最有应用前景的水印技术。视频水印方法主要有两种: 空间域^[1]方法和变换域^[2]方法。与空间域方法相比, 变换域尤其是 DCT (离散余弦变换) 域上的水印方法主要有以下优点: 一是在变换域中可有效地利用人类视觉系统的某些特征, 在高频分量嵌入数据, 以增强水印的鲁棒性 (水印嵌入强度); 二是也可选择低频分量嵌入数据能以使能量扩散到空间域所有像素上, 提高水印图像质量 (不可感知性); 三是可与国际数据压缩标准如 MPEG 等兼容, 同时在 DCT 域实现的水印算法, 计算复杂性也往往较低。

典型的 DCT 域水印方法是 Cox 等人^[2]提出了一种基于 DCT 域扩频水印技术, 把满足正态分布的伪随机序列嵌入到有限个幅度较高的 DCT 系数上, 主要缺点是恢复水印必须有原始图像的参与。不利用原始图像就能进行水印的统计检测^[3]常常是人们所追求的目标之一。另外, 在许多多媒体应用中, 人们常常希望同一视频水印内容能有不同空间分辨率的压缩版本, 而从高分辨率的水印图像获得低分辨率的水印图像则需要进行下采样。最近, Chu^[4]提出了一种 DCT 域水印技术: 将服从标准正态分布的水印序列嵌入到图像不同下采样图像中, 不利用原始下采样图像就能进行水印的相关检测, 主要不足: 一是检测水印需要两个以上的下采样水印图像, 二是没有充分应用人眼的视觉特性, 而使水印图像质量有所下降, 三是对 DCT 域下采样鲁棒性 (视频经下采样处理后仍能够检测到水印的能力) 较差。本文的主要目标是根据 DCT 域 Watson 模型^[5]提出了抵抗下采样攻击的不可感知水印模型, 基本思路是, 首先根据原始图像的感知失真限制和 DCT 域下采样视频序列的全局、局部亮度特征来优化加性控制嵌入服从标准

正态分布的水印序列的区域和长度, 以使下采样水印图像质量的下降最小化, 其次将得到的下采样水印视频再经上采样后便得到了原始图像的水印版本. 优点是不使用原始下采样图像, 就能进行水印的相关检测, 实验结果表明, 该算法对噪声干扰及视频下采样具有较好的鲁棒性, 虽然水印图像的质量有所下降, 但并不影响水印图像的视觉效果. 本水印方案高速可靠, 适合于版权保护以及实时认证应用.

2 DCT 域 Watson 感知模型^[5]

对图像每一个 DCT 变换系数, 建立人类视觉系统的三个特性(对比度敏感性 T_c 、亮度敏感性 T_L 以及频率敏感性 T_F)的感知模型:

$$T_c(b, i, j) = \max\{T_L(b, i, j), |X(b, i, j)|^{\beta(i, j)} \cdot (T_L(b, i, j))^{1-\beta(i, j)}\} \quad (1)$$

$$T_L(b, i, j) = T_F(i, j) \left(\frac{X(b, 0, 0)}{\bar{X}(0, 0)} \right)^\alpha \quad (2)$$

其中: $X(b, i, j)$ 是图像亮度块 b 的第 (i, j) 个 DCT 系数, $X(b, 0, 0)$ 表示亮度块 b 的 DC 分量, $\bar{X}(0, 0) = \frac{1}{8B} \sum_{i=1}^B X(b, 0, 0)$ 表示原始图像亮度块的均值, B 是原始图像亮度总块数. $\alpha = 0.649$, $\beta(i, j) = 0.7 (i \neq 0 \text{ 或 } j \neq 0)$ 分别控制亮度敏感性和对比度敏感性的强度, $i, j = 0, 1, \dots, 7$.

3 提出的 DCT 域视频下采样水印方案

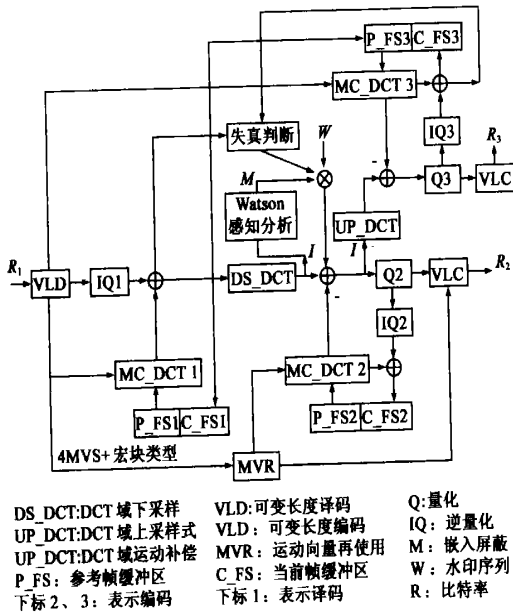


图 1 DCT 域下采样水印方案示意图

3.1 DCT 域准卷积下采样与上采样^[6]

给定原始图像 $Y[n_1, n_2]$, 记下采样图像为 $X[k_1, k_2]$, 而用 $Y[n_1, n_2]$ 表示上采样重构图像, $n_1 = 0, \dots, N_1 - 1, n_2 = 0, \dots, N_2 - 1, k_1 = 0, \dots, N_1/2 - 1, k_2 = 0, \dots, N_2/2 - 1$.

将 DCT 域上任意一个 16×16 的宏块 M 下采样为 8×8 的块 B , 其矩阵表达式为:

$$SMS^T = B \quad (3)$$

而将 8×8 的块 B 上采样为一个 16×16 的宏块 M 的矩阵表达式如下:

$$UBU^T = M \quad (4)$$

其中, $S = \frac{1}{\sqrt{2}}(C_{16LL}C_8^T, C_{16HH}C_8^T)$, $U = (\sqrt{2}C_{16LL}C_8^T, \sqrt{2}C_{16HH}C_8^T)^T$ (5)

C_8 表示 8×8 的 DCT 变换矩阵, 而 C_{16} 表示 16×16 的 DCT 变换矩阵:

$$C_{16} = \begin{bmatrix} C_{16LL} & C_{16HH} \\ C_{16LH} & C_{16HH} \end{bmatrix} \quad (6)$$

3.2 下采样图像水印嵌入方案

用服从标准正态分布的随机数矩阵 W 做为水印序列, 则将 W 加性嵌入到下采样图像 X 中的方法如下:

$$X_w = X + \alpha W_c \quad (7)$$

其中 α 为全局缩放系数, $W_c = T_c \cdot W \cdot M$, 符号 \cdot 表示将矩阵各元素逐个对应相乘, M 是嵌入屏蔽值:

$$M = \begin{cases} 1, & |X| \geq T_c \\ 0, & |X| < T_c \end{cases} \quad (8)$$

利用式(4), 对 X_w 进行上采样便得到期望的水印图像 Y_w . 为了有效地抵抗对水印图像 Y_w 的下采样攻击, 需要根据目标感知距离 D_{target} 确定全局缩放系数 α 及优化下采样水印相关检测.

3.3 全局缩放系数的确定

设下采样图像 X 的总像素个数为 N , 我们选择用感知距离 $D_{wat}(X, X_w)$ 自适应控制水印的嵌入强度, 由于

$$\begin{aligned} D_{wat}(X_w, X) &= \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k, i, j} \left(\frac{X_w(k, i, j) - X(k, i, j)}{T_c(k, i, j)} \right)^2} \\ &= \alpha \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k, i, j} \left(\frac{W_c(k, i, j)}{T_c(k, i, j)} \right)^2} \\ &= \alpha D_{wat}(X, X + W_c) \end{aligned} \quad (9)$$

因此, 要使 $D_{wat}(X_w, X)$ 等于目标感知距离 D_{target} , 下采样水印图像 X_w 的全局缩放系数 α 就必须取值为:

$$\alpha = \frac{D_{target}}{D_{wat}(X, X + W_c)} \quad (10)$$

3.4 下采样水印图像相关检测的优化

在加性高斯白噪声 X 作用下, 检测水印信号的最佳途径是, 计算接收到的视频图像 $X_w = X + K$ 与水印序列 W 之间的线性相关值^[3]:

$$Z = C(X_w, W) = X_w \cdot W \quad (11)$$

如果 $Z \geq T(c)$, 则下采样图像中含有水印, 否则就不含有水印了. 其中最佳阈值 $T(c)$ 可由水印系统的总误码率来确定^[7].

水印相关检测的优化问题就是: 在感知失真 $D_E = D_{wat}(X_w, X)$ 给定的情况下, 求使水印相关检测值达到最大时的水印嵌入值 $K = K_1 K_2, \dots, K_N$:

$$\frac{\partial C(X_w, X)}{\partial K_i} - \lambda \frac{\partial D_{wat}^2(X_w, X)}{\partial K_i} = 0 \quad (12)$$

$$\text{即由 } W_i - \frac{\lambda}{N} \cdot \frac{2K_i}{T_c^2} = 0, \text{ 得 } K_i = a \cdot W_i \cdot T_c^2 \quad (13)$$

其中 λ 是常数, $a = \frac{N}{2\lambda}$ 的值应该与感知失真限制成正比, 即

$$a = \frac{D_E}{\left(\sum_{i=1}^N W_i^2 \cdot T_c^2 \right)^{1/2}} \quad (14)$$

4 实验结果

将比特率为 4Mbps 的 MPEG-2 三个视频序列: mobil, tens 及 flwr 我们直接在 DCT 域上下采样转码为比特率为 2Mbps 的 MPEG1 视频, 转码前后帧速率、图像组 (GOP) 结构 (IBBPBBPBBPBB) 和色度格式 (4:2:0) 均不改变。

对于给定的下采样方法, 通常采用峰值信噪比 PNSR_2 (最大像素值的平方与 MSE 之比) 来评价该下采样图像的质量, 其中 MSE 为水印图像 X_W 与原始下采样图像 X 之间的均方误差, 同样用 PNSR_1 表示相应上采样水印图像的峰值信噪比,

$$\text{即 } \text{PNSR}_1 = 10 \log_{10} \left(\frac{255 \times 255}{\|Y_W - Y\|_2} \right).$$

用 Cox 方法^[2]、Chu 方法^[4] 及我们提出的方法, 下采样和上采样水印图像峰值信噪比 (PNSR) 的比较见表 1。从表 1 不难看出我们提出的下采样优化水印方案要优于前两者, 其 PNSR 平均高 2.35dB。其主要原因是我们充分利用了人类的视觉特征且通过感知失真限制优化水印方案。虽然水印图像的质量有所下降, 但并不影响水印图像的视觉效果 (见图 2)。

表 1 下采样和上采样水印图像的 PNSR (水印长度 $n=4000$ 目标感知距离 $D_{\text{target}}=0.1$)

方法	mobil.m2v		flwr.m2v		tennis.m2v	
	PNSR_2	PNSR_1	PNSR_2	PNSR_1	PNSR_2	PNSR_1
Cox 方法 ^[2]	29.2	26.8	28.2	27.5	31.5	35.6
Chu 方法 ^[4]	26.0	25.6	26.8	21.3	30.6	25.9
我们的方法	29.8	27.6	28.8	27.8	31.7	35.9

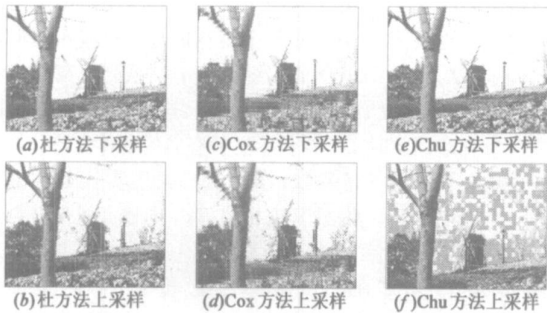


图 2 视频序列 flwr.m2v 的下采样水印图像 (上图) 和上采样水印图像的比较 (下图)

5 结论

根据 DCT 域 Watson 模型提出了一种抵抗下采样攻击的不可感知水印模型, 不使用原始图像, 就可进行水印的相关检测。实验结果表明该算法对噪声干扰及视频下采样具有较好的鲁棒性。本文嵌入的水印仅仅是一个随机序列, 可读性较差, 而嵌入有意义的水印信息 (如图像、文字或 Logo) 要比仅仅

嵌入一个随机序列更能证明版权的所有者, 同时检测结果给出一个可读水印信息要比仅仅给出有无水印要具有更高的可信度。另外, 如何计算一个数字视频媒体所能隐藏的最大安全信息量 (水印编码的比特数); 如何对视频转码及水印进行联合优化, 将是今后研究的重点和难点。

参考文献:

- [1] Nikolaidis N, Pitas I. Robust image watermarking in the spatial domain [J]. IEEE Signal Processing, 1998, 66(3): 385-403.
- [2] Cox I J, Kilian J, Leighton T, Shamoon T. Secure spread spectrum watermarking for multimedia [J]. IEEE Trans Image Processing, 1997, 6(12): 1673-1687.
- [3] Zeng W, Liu B. A statistical watermark detection technique without using original images for resolving rightful ownerships of digital images [J]. IEEE Trans Image Processing, 1999, 8(11): 1534-1548.
- [4] Chu W C. DCF based image watermarking using subsampling [J]. IEEE Trans on multimedia, 2003, 5(1): 34-38.
- [5] Watson A B. visually optimized DCT quantization matrices for individual images [A]. Data Compression Conference, 1993. DCC'93 [C]. Los Angeles, 1993. 178-187.
- [6] 杜耀刚, 蔡安妮, 孙景鳌. 一种高效的 DCT 域图像下采样方法 [J]. 中国图像图形学报, 2005, 10(4): 511-515.
- [7] DU Yao Gang, CAI An Ni, SUN Jing Ao. An efficient method for DCF domain image downsampling [J]. Journal of Image and Graphics, 2005, 10(4): 511-515. (in Chinese)
- [8] Herna' ndez J R, Amado M, Pe' rez Gonze' lez, F. DCF domain watermarking techniques for still images: Detector performance analysis and a new structure [J]. IEEE Trans Image Processing, 2000, 9(1): 55-68.

作者简介:



杜耀刚 男, 1964 年 3 月生于山西万荣, 北京电子科技学院基础部副教授, 现为北京邮电大学通信与信息系统专业在职博士研究生, 研究方向为多媒体通信、视频转码和视频水印等。
E-mail: duyao gang@best.i.edu.cn.



蔡安妮 女, 1943 年生于浙江德清, 教授, 博士生导师, 1989 年在美国加利福尼亚大学圣巴巴拉分校电机与计算机工程系获博士学位, 研究领域为多媒体通信、流媒体技术、图像处理与图像识别等, 发表论文 60 余篇, 出版专著 6 部。