

基于视频压缩标准的自适应信息隐藏算法*

陈青, 牛月蕊, 连攀攀, 邢晓溪, 胡琪雯

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要: 为了使信息隐藏算法在经受有损压缩后仍能可靠地提取嵌入的信息, 提出一种信息隐藏和 MPEG-2 压缩编解码器一体化的方法。根据压缩程度和宿主内容, 结合 HVS 约束、隐藏容量的需求及有损压缩失真影响等因素, 利用 MPEG-2 压缩的控制参数调整信息隐藏的强度和数量, 从而自适应实现视觉质量、内嵌容量和鲁棒性等参数的折中。实验结果表明, 该算法除了能抵抗较强的有损压缩外, 对常见攻击, 如低通滤波、噪声干扰、帧丢失以及转码等也具有鲁棒性, 是一种在 MPEG-2 有损压缩框架下, 用灵活的折中机制来隐藏和准确提取信息的有效鲁棒信息隐藏算法。

关键词: 信息隐藏; 离散余弦变换; 人类视觉系统; 数据压缩

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2012)12-4659-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.12.066

Adaptive information hiding algorithm based on video coding standard

CHEN Qing, NIU Yue-ru, LIAN Pan-pan, XING Xiao-xi, HU Qi-wen

(School of Optical-Electrical & Computer Engineering, University of Shanghai for Science & Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In order to get reliable retrieval of embedded message under lossy compression, this paper developed an algorithm that integrated data hiding into the MPEG-2 codec. It associated the adjustment factor of the strength and quantity of data hiding with the control parameter of lossy compression, combined with the constraint of human visual system, the demand of hiding capacity and distortion impact of lossy compression, to achieve a trade-off of visual quality, capacity, robustness and other parameters adaptively. Experimental results show that the proposed algorithm not only resists strong lossy compression, but also possesses robustness to common attacks, including noisy interference, low-pass filtering, transcoding and frame dropping. Thus it is an effective robustness hiding algorithm with flexible compromise mechanism to hide and accurately retrieve hidden data in a MPEG-2 lossy compression framework.

Key words: data hiding; DCT; human visual system(HVS); MPEG compression

0 引言

为了有效地存储和传输, 对加水印的载体进行压缩是十分必要的。基于感知的压缩算法消除了不相干的冗余信息, 但这些部分很可能与嵌入的信息有关。对加水印的载体进行压缩会引起两个主要问题: a) 有损压缩可能使内嵌到数字媒体中的信息遭到破坏而无法提取; b) 使后续压缩无法在保持嵌入信息隐蔽性的同时获取理想的压缩水平。为了使基于信息隐藏技术的应用可行, 一个根本问题就是在几个关键的信息隐藏特性中(如不可见性、内嵌容量及鲁棒性等) 找到一个合适的折中。基于分块 DCT 压缩标准的广泛使用, 使得兼容 MPEG-2 压缩标准的信息隐藏算法成为一个重要的研究方向^[1-5]。

大量的研究提出各种算法来折中相互冲突的几个信息隐藏特性。Cox 等人^[6] 提出了两个非常重要的概念来折中信息隐藏中的鲁棒性和透明性。首先, 信息应该嵌入到载体信号最重要的视觉分量处来获得较强的鲁棒性; 其次, 扩频通信的应用使得嵌入信息时对载体的修改最小化, 以避免视觉失真。也

有文献提出用人类视觉模型来折中这些相对立的特性^[7,8]。

对信息隐藏算法中的几个相互冲突的参数进行合理的折中往往和与定的应用联系在一起。如版权保护应用, 可能需要较强的鲁棒性, 但需要牺牲容量和计算效率等性能; 而在其他应用情形中可能强烈要求盲检测和恢复内嵌的水印信息(不像版权保护中只需判断水印是否存在), 对鲁棒性只要求中等强度。尽管现有文献已在不同应用领域对信息隐藏的性能折中做出了一系列贡献, 但一般算法在遇到不同的信号内容和压缩要求时, 只能被动地通过实验来确定各种参数。而加水印后的数字载体的压缩可能需要动态地适应不同的网络容量以及终端条件, 因而希望参数的折中也是动态的方式。视频信息隐藏需满足的条件如下:

- a) 信息隐藏对有损压缩具有鲁棒性, 并且在不知道原宿主的情况下可以检测水印。
- b) 当内嵌信息需要用于后续处理过程时, 完全恢复内嵌信息成为必须满足的条件。
- c) 对不同的宿主内容和压缩要求, 算法能提供持续的良

收稿日期: 2012-05-12; **修回日期:** 2012-06-26 **基金项目:** 教育部留学人员启动基金资助项目(3309306001); 上海自然科学基金资助项目(12ZR1420800)

作者简介: 陈青(1962-), 女, 湖北武汉人, 副教授, 博士, 主要研究方向为数字水印、图像编码(qchen@usst.edu.cn); 牛月蕊(1987-), 女, 山东菏泽人, 硕士研究生, 主要研究方向为数字水印; 连攀攀(1987-), 男, 安徽淮南人, 硕士研究生, 主要研究方向为数字水印; 邢晓溪(1986-), 女, 北京人, 硕士研究生, 主要研究方向为数字水印; 胡琪雯(1989-), 女, 江西吉安人, 硕士研究生, 主要研究方向为数字水印。

好视频质量和可靠的水印恢复性能。

本文提出一种基于视频压缩标准的信息隐藏算法,可以根据压缩程度和宿主内容,自适应地控制嵌入过程,实现上述要求。

1 算法描述

为满足上述要求,本文提出的信息隐藏和压缩标准一体化算法的基本策略如下:

a) 为使载体视频在嵌入水印以及进一步的有损压缩后仍有良好的视觉质量,本文应用视觉模型,它提供了进行细微修改可用空间的上限。

b) 除了利用上述 HVS 模型以增加内嵌强度、提高鲁棒性外,还利用冗余内嵌降低攻击对内嵌信息的影响,并将冗余内嵌的参数与压缩算法的量化参数相结合,使鲁棒性的改善适合应用的目标压缩强度,在隐蔽性、内嵌容量和抗压缩性能间折中。

c) 为了在适当折中下实现信息的可靠恢复,根据预设的压缩程度和 HVS 模型来估计内嵌容量,只要嵌入数据率低于估计的容量,对各种参数自适应折中,嵌入信息就可以准确可靠地提取。

1.1 信息嵌入算法

a) 视觉掩膜的构造。Watson^[9]提出一种用于确定临界可见误差阈值(JND)的视觉模型,其主要思想可概括为:首先确定亮度掩蔽阈值

$$l_k(i, j) = l(i, j) \left(\frac{x_k(0, 0)}{\bar{x}(0, 0)} \right)^{\alpha_T} \quad (1)$$

其中: $l(i, j)$ 表示 HVS 的频率灵敏度; $x_k(0, 0)$ 表示第 k 个块的 DC 值; $\bar{x}(0, 0)$ 为所有直流系数的平均值; α_T 为常数,建议取 0.649。再调整亮度掩蔽:

$$\text{mask}_k(i, j) = \max(l_k(i, j), |x_k(i, j)|^{\beta_{ij}} l_k(i, j)^{1-\beta_{ij}}) \quad (2)$$

其中: β_{ij} 是 0~1 之间的常数,经验值取 $\beta_{ij} = 0.7$; $x_k(i, j)$ 代表第 k 个块经变换后得到的 DCT 系数。

b) 容量估计。文献[10]给出了将每一个系数当做有各自噪声分布的独立随机变量而估算出的私有水印容量:

$$C_{\text{total}} = \sum_{i=1}^n C_i = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{W_i}{N_i} \right) \quad (3)$$

其中: W_i 、 N_i 分别是第 i 个数处的水印的能量和噪声能量, n 是系数的个数。本文提出的信息隐藏系统的内嵌容量还将受到鲁棒性和盲检测要求的影响,并按下述方法计算。

Watson 视觉模型的 JND 阈值提供了各系数所能容忍的最大幅度的改变,因而每个系数因有损压缩导致的量化误差与 JND 之差是信息隐藏所能利用的最大修改量。设 JND_i 表示 8×8 像素块中按 zigzag 扫描排序第 i 个变换系数的 JND, E_i 表示第 i 个变换系数的量化误差,则第 i 个变换系数允许嵌入的强度可表示为

$$D_i = JND_i - E_i \quad (4)$$

本文主要以 MPEG-2 标准的编码系统为例,但此方法也适用于其他混合编码方案。MPEG-2 的量化误差可表示为

$$E_i = Z_i - Z_i / (q \times M_i) \times (q \times M_i) \quad (5)$$

其中: q 表示 MPEG-2 的量化因子, M_i 表示帧间量化矩阵的第 i 个元素。式(3)中水印能量 W_i 的计算如下:

$$W_i = D_i^2 = (JND_i - E_i)^2 \quad (6)$$

在盲检测中有两个噪声源:a)原载体,在提取过程中因未知而看成噪声源;b)由于处理(如压缩)引入的噪声。这两种噪声可以用加性高斯白噪声模型来表示,并假设它们是互不相关的独立同分布(i. i. d)。式(3)中的噪声 N_i 可由式(7)表示。

$$N_i = Z_i^2 + E_i^2 \quad (7)$$

在随后的 MPEG 压缩中,为了可靠地提取隐藏信息,本文使用冗余编码,并使重复因子 γ (表示冗余嵌入的次数)随着后续压缩失真的增减而增减。本文的策略是用量化因子 q 来调整重复因子,由于失真随着 q 的增加而增加,因此 γ 与 q 的关系可设置如下:

$$\gamma = a \times q + b \quad (8)$$

其中: a 、 b 为常数,通常 b 的取值大于 5。

容量受冗余内嵌及盲检测的影响,其中用到一对系数来嵌入 1 比特水印,于是鲁棒盲检测信息隐藏系统的嵌入容量为

$$C_b = \frac{C_{\text{total}}}{2\gamma} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{4\gamma} \log_2 \left(1 + \frac{W_i}{N_i} \right) \quad (9)$$

c) 信息嵌入。算法通过修改视频序列 I 帧中的低频到中频的一组选定的 DCT 系数来嵌入水印。首先,计算 JND,并估计信息隐藏的容量。为了能够精确提取嵌入的信息,实际嵌入的信息量必须低于估计的信息隐藏容量。由式(8)确定重复因子 γ ,待隐藏信息的每一位 $m_j \in \{ \pm 1 \}$ ($j=1, \dots, L$) 将重复 γ 次,并且映射成标记位 w_i 。

$$w_i = m_j \quad i = j + L \times r, r = 0, 1, \dots, \gamma - 1 \quad (10)$$

在每个 DCT 块中,按 zigzag 扫描顺序将每两个相邻的系数结合组成系数对 (Z_1, Z_2) ,每一个系数对按下述方法修改 Z_1 、 Z_2 的值来嵌入水印:

$$\left. \begin{aligned} Z'_1 &= Z_1 \pm \text{JND}_1 \\ Z'_2 &= Z_2 \mp \text{JND}_2 \end{aligned} \right\} \text{当 } w_i = \pm 1 \quad (11)$$

满足下述关系:

$$\left\{ \begin{aligned} \text{当 } w_i = +1 \text{ 时 } & Z'_1 > Z'_2 \\ \text{当 } w_i = -1 \text{ 时 } & Z'_1 < Z'_2 \end{aligned} \right. \quad (12)$$

1.2 信息提取算法

与嵌入步骤类似,提取在变换域中进行,但既不使用 HVS 模型也无须用到量化因子,因此提取算法的复杂度相当低。通过比较系数对 (Z'_1, Z'_2) 中元素的关系来提取标记位 w_i :

$$\left. \begin{aligned} \text{如果 } Z'_1 < Z'_2 \text{ 则 } & w_i = +1 \\ \text{如果 } Z'_1 > Z'_2 \text{ 则 } & w_i = -1 \end{aligned} \right. \quad (13)$$

通过下述方式恢复嵌入信息 a_j :

$$\left. \begin{aligned} m_j = +1 & \text{ if } \sum w_i > 0 \\ m_j = -1 & \text{ if } \sum w_i < 0 \end{aligned} \right\} i = j + L \times r, r = 0, \dots, \gamma - 1 \quad (14)$$

2 实验结果

本文使用了 MPEG 官网上的 MPEG-2 仿真软件来实现信息隐藏与 MPEG-2 编解码器的一体化。所有测试视频序列的大小为 352×240 , GOP 长度为 12, 帧率 25 fps。实验测试显示,相对 MPEG-2 编码和解码来说,嵌入和提取的平均执行时间分别增加了 9%、3%,因此允许实时处理。

本文用 flower、Susie 及 mobile & calendar 进行不可见性测试。所有视频在每个 I 帧嵌入 64 bit 信息(约 133 bps), 低于 flower 在 1.5 Mbps 的估计容量 68 bit, Susie 在 2 Mbps 的估计容量 172 bit 和 mobile & calendar 在 4 Mbps 的估计容量 213

bit。所有内嵌信息在 MPEG-2 以相应的比特率进行编码后能精确提取。原视频和嵌入水印后的视频的比较如图 1 所示,原始视频的信噪比分别为 36.12、40.07、32.17 dB,由图 1 可知嵌入水印后的视频没有视觉失真。文献[3]中,在比特率为 4 Mbps 的 mobile & calendar(704×480, 30 fps)视频中嵌入 120 bit 水印信息,信噪比为 27.6 dB。文献[11],在比特率为 6 Mbps 的 flower 和 mobile & calendar(PAL704×576, 25 fps)视频中嵌入 188 bit 水印信息时,信噪比分别为 38.88、40.05 dB。本文算法在相似的信噪比下,内嵌数据量与载体数据量之比更优。

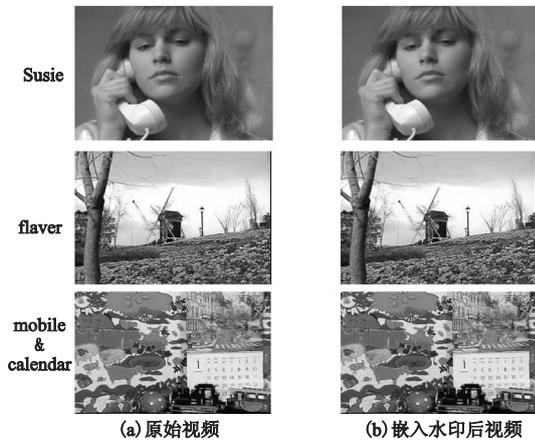


图1 原视频(左)与加水印视频(右)的比较

容量、信噪比与比特率的关系测试:mobile & calendar 视频在不同的比特率下估计的容量如图 2 所示,图中显示的是分别按 64 bit 和估计的容量嵌入信息,然后进行 MPEG-2 编码,视频的质量退化(用信噪比测量)的情况。结果表明,当要求的内嵌容量较低时,可以通过牺牲内嵌速率来获得更好的不可见性;当嵌入 64 bit 信息,除了在 0.575 Mbps(超过了估计容量 59 bit)处有 2 bit 提取误差外,所有的嵌入信息都可成功恢复。而且算法在满足可靠提取的前提下,有较大的内嵌容量。

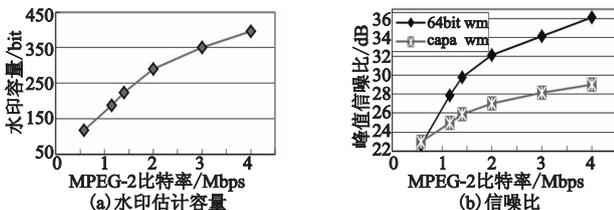


图2 Mobile & calendar序列的估计容量和信噪比

转码测试:对 mobile & calendar 视频按预设能抵抗 2 Mbps 编码强度分别嵌入 64、100、120 bit 信息,先进行实际 4 Mbps 编码,之后解码并再次以相同 GOP 长度、更低的比特率(3.2、1.4、1.15 和 0.575 Mbps)编码,正确提取的内嵌信息量示于图 3 中。由图 3 可见,三种内嵌容量都能抵抗预设强度的编码,准确恢复内嵌信息;在更低的码率时,随压缩增大提取错误增加。

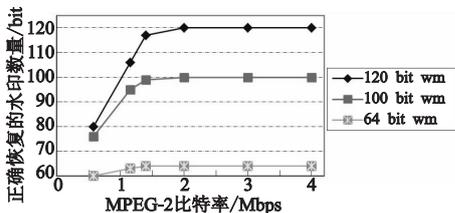


图3 以不同比特率转码操作后提取的信息量

鲁棒性测试:对 flower 嵌入 64 bit 信息以 1.5 Mbps 码率编码,再分别加方差为 0.02 的加性高斯噪声、噪声密度为 0.03 的椒盐噪声、标准偏差为 0.2 的 4×4 的高斯低通滤波、单帧或连

续两帧丢失等操作,隐藏的信息都可以正确提取。图 4 显示的是相应视频质量的比较。本文的方案是水印只嵌入在视频 I 帧的 DCT 直流系数和中频系数中,因为 I 帧不可以被跳跃或删除,故对帧跳跃、帧删除、帧重组等攻击形式也具有较好的鲁棒性。

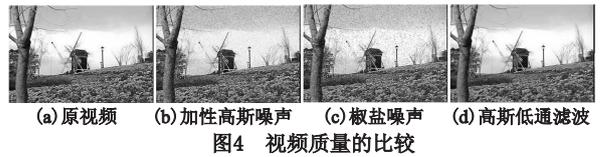


图4 视频质量的比较

3 结束语

本文提出了一种能够可靠恢复内嵌信息的自适应数据隐藏算法,将冗余内嵌的参数与压缩算法的量化参数相结合,使信息隐藏算法的鲁棒性得到改善和控制,从而在不可感知性、容量及抗压能力之间取得最佳折中。实验结果表明,该算法除了能抵抗较强的有损压缩外,对常见的攻击,如低通滤波、噪声干扰、帧丢失、转码等也具有较好的鲁棒性。该算法在提取时既不使用 HVS 模型也无须用到量化因子,因而算法简单、容易实现,能够进行实时处理。但对算法鲁棒性的设计仅考虑了衰落性攻击,不能抵抗破坏同步的几何攻击。

参考文献:

- [1] 朱仲杰,蒋刚毅,郁梅,等. MPEG-2 压缩域的视频数字水印新算法[J]. 电子学报,2003,32(1):21-24.
- [2] HUANG Liang. Research on the MPEG-2 video watermarking scheme based on spread spectrum technology [C]//Proc of ICCET. 2009: 408-411.
- [3] JIANG Ming, MA Zhao-feng, NIU Xin-xin, et al. Video watermarking scheme based on MPEG-2 for copyright protection[J]. Procedia Environmental Sciences, 2011, 10(A): 843-848.
- [4] 郑鹏,刘敏忠. 一种基于 DCT 域的视频水印算法[J]. 武汉理工大学学报,2009,18(31):9-11.
- [5] 凌贺飞,卢正鼎,邹复好,等. 基于 Watson 视觉感知模型[J]. 软件学报,2006,17(2):1124-1132.
- [6] COX I J, KILIAN J, LEIGHTON T. Secure spread spectrum watermarking for multimedia[J]. IEEE Trans on Image Processing, 1997,6(12):1673-1687.
- [7] 史长城,康志伟. 基于人类视觉感知的下采样转码视频水印[J]. 计算机应用研究,2010,27(9):3449-3451.
- [8] MA Yong, TIAN Yu-min, QU Yun-hui. Adaptive video watermarking algorithm based on MPEG-4 streams[C]//Proc of IEEE International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision. 2008: 1084-1088.
- [9] WATSON A B. DCT quantization matrices visually optimized for individual images[C]//Proc of SPIE IV. 1993: 202-216.
- [10] LIN Ching-yung, CHANG Shih-fu. Watermark capacity of digital image based on domain-specific masking effects[C]//Proc of IEEE International Conference on ITCC. 2001:90-94.
- [11] Van DAMNJANOVIC I, IZQUIERDO E. Perceptual watermarking using just noticeable difference model based on block classification [C]//Proc of the 2nd ACM International Conference on Mobile Multimedia Communications. 2006:324.
- [12] WOLFGANG R, PODILCHUK C, DELP E. Perceptual watermarks for digital images and video[J]. Proceeding of the IEEE, 1999, 87(7):1108-1126.