

数字视频广播中的压缩域水印算法

邵亚非, 吴国威, 张 利, 林行刚

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

摘 要: 本文对数字视频广播中的水印技术进行了研究, 提出了一种 MPEG2 码流域的视频水印算法, 考虑人眼视觉特性, 通过对特定位置 DCT 系数进行修改, 以实现水印的嵌入. 并且根据视频帧的不同特性, 实现了检测阈值的动态选取. 本文的方法, 计算复杂度低, 易于实现, 并具有较高的鲁棒性, 能够应用于拷贝控制, 用户追踪等场合.

关键词: 数字视频广播; 数字水印; 版权保护

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 10-1562-04

Compressed Domain Watermarking Algorithm in Digital Video Broadcasting

SHAO Ya-fei, ZHANG Li, WU Guo-Wei, LIN Xing-gang

(Dept of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In order to deal with the copyright issues in DVB environment, a MPEG domain watermarking algorithm is proposed here. The watermark is embedded by modulation of corresponding DCT coefficients according to human visual system. The threshold of the detection correlator is dynamically adjusted along the time-axis to fit the frame characteristics. The proposed method is of low complexity and easy to be implemented in terminal consumer electronics devices. It has enough robustness in the copy control and user tracing scenarios.

Key words: digital video watermarking; digital watermarking; copyright protection

1 引言

随着数字视频广播 (DVB) 的推广, 用于接收数字电视的机顶盒将越来越普及, 用户将可以通过卫星或者有线网络收看到高质量的 MPEG2 视频节目, 同时, 也给版权的保护带来了新的问题. 传统的数字电视条件接收系统 (CA), 通过加密和加扰的手段, 只能对传输环节进行保护, 但当合法用户对节目进行接收解密存储之后, 仍然存在着非法复制的可能. 对于传统的模拟录像机, 可以通过对输出符合视频信号的行场同步进行错位, 来防止非法录制. 但是, 在家庭网络中, 不论如何复制, 码流总是加密的, 可以利用数字水印与传统加密手段相结合, 作为一个控制拷贝的播放, 协助实现拷贝控制和追踪的附加手段, 这一点与 DVD 是相同的^[1]. 在这种情况下, 则可以在 DVB 的接收终端上, 在用户进行播放或个人合法录像时嵌入用于拷贝控制的水印, 从而防止用户进行超过授权许可的再次复制, 以及播放被解密后的非法拷贝等. 或者, 将与用户 ID 相关的水印信息嵌入到视频码流中, 以识别用户身份.

除了对于一般水印技术的要求如鲁棒性, 不可感知性之外, 视频广播中水印技术必须满足下面的要求: 算法应当达到实时, 并且复杂度较低, 水印的嵌入应当能够在视频解码的同时完成, 或者直接在码流域嵌入从而易于在终端设备上实现;

对于拷贝控制, 应当在没有原始视频的条件下实现水印的检测; 码流在添加水印之后, 其大小应当不发生太大增加, 从而不增加传送带宽; 必须保证极低的误判概率.

目前大多数的数字视频水印算法^[2], 都是针对未编码视频的, 而实际中, 视频更多的是以压缩的形式存在和传播的, 尤其是必须在用户终端上实现的算法, 在解码后添加水印, 再进行编码是不现实的, 因此研究的重点是以低复杂度和易于在终端实现的算法来达到应用的要求. Hartung^[3]利用扩频技术将水印嵌入 MPEG2 码流, 由于引入了飘移补偿来克服编码时的预测, 从而大大增加了运算的复杂度. Langelaar 等^[5]通过直接修改 VLC 的编码值实现了一种用于拷贝控制的水印方法, 算法复杂度低, 但是, 由于水印与码流结构密切相关, 因此当对码流解码后进行重新压缩, 则能将其有效去除. 文[6]中提出了另一种 DEW 方法, 其参数必须经过仔细选择以避免引起失真, 同时, 在重新压缩下的鲁棒性也比较有限^[7]. Jordan^[8]采用 MPEG2 码流的运动矢量来嵌入水印, 但是, 如果在对视频解码后的码流进行水印的检测则需要重新编码以获得运动矢量. 针对以上问题, 本文提出了一种用于数字视频广播的低复杂度水印算法, 在 MPEG2 码流中实现水印的嵌入, 利用人眼视觉特性, 选取嵌入强度和位置. 在水印检测中, 引入动态的阈值选取方法, 从而在时间轴上保持相同的差错概率. 本文

的方法,可以直接在 MPEG2 比特域中进行运算,嵌入算法计算量低,同时具有较强的鲁棒性.它即可以作为指印追踪用户,也可以在拷贝控制中,作为第二个水印在终端嵌入,和 Copy. Once 共同表示 Copy. No. More^[1].对于几何变化的鲁棒性则可以通过频域模板来实现,它同样可以在 VLC 解码后进行而不需要完全的 MPEG2 解码,这将在我们另外的文章中详细论述^[9].

2 水印的嵌入

本文中,我们通过对 MPEG2 码流内分块 DCT 系数的符号进行修改,来实现水印的嵌入,在对 MPEG2 码流进行 VLC 逆变换之后,可以得到量化后的 8×8 分块的 DCT 系数以加入水印.水印嵌入的过程如图 1 所示.水印的嵌入只针对 MPEG2 码流的 I 帧进行,这样降低了运算的复杂度,同时,由于视频编码时采用了帧间预测,一部分水印信息也会被带到 P 或 B 帧内.

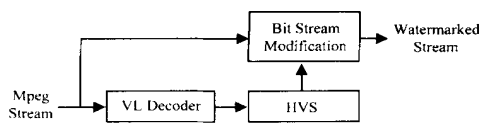


图 1 水印的嵌入过程

我们采用取值为 $\{-1, 1\}$ 的随机序列作为水印,它可以用下面的方式描述

$$w = \text{rand}(k, l) \quad (1)$$

其中, w 为生成的水印,其长度为 l , k 是用于 $\{-1, 1\}$ 随机序列发生器 rand 的密钥.

$$l = m * f_w * f_h / 64 \quad (2)$$

每个 8×8 分块中选择 m 个 DCT 系数来记载水印的信息,视频帧的宽度和高度分别为 f_w 和 f_h .这样,每个水印 bit 与其嵌入位置之间存在着对应的关系,(虽然这一位置是否适宜嵌入还需要根据下面的规则来进行判决),这对于水印的检测是很重要的.

设被选中的 DCT 系数为 $F(i, j)$,即该帧中第 i 个 DCT 分块中 zig-zag 序号为 j 的系数.一般而言, $F(i, j)$ 被选为偏向高频部分的系数,以减小嵌入水印引起的视觉失真.如果该位置对应的水印 w 为 1, $F(i, j) > 0$,否则,令 $F(i, j) < 0$,这相当于对 DCT 系数的相位进行调制^[8],所不同的是,本文中是基于分块 DCT 来进行的,因此可以利用人眼视觉特性来局部调整嵌入强度,而不是简单的将相位改变.因为人眼对边缘和平滑区域的失真比较敏感,因此,我们需要对该 DCT 块的活动性进行判断,如果活动性大于某一阈值 T ,则认为该 DCT 块的活动性较强,可能有较强的纹理,可用来携带水印信息.此时,上述过程可表示为:

$$F(i, j) = s \cdot w \quad (3)$$

$F(i, j)$ 为修改后的 DCT 系数.为水印的强度,它是一个与分块活动性自适应的值.在允许增加计算复杂度的前提下,可以通过计算 DCT 分块系数方差 var ,来衡量这一活动性:令

$$s = \log_2(\text{var}) - T \quad (4)$$

若 $s > 0$,令 $s = 0$,则此位置因活动性较低而不嵌入水印.如果更加重视计算简便,则可以采用分块中非零 DCT 系数的个数来预测活动性.

边缘分块也具有较弱的活动性,将含有边缘的 DCT 分块系数符号进行修改,或者由零变为非零,都容易引起明显的视觉失真,所以应当将边缘排除出去.这里,我们采用了文[3]中的快速边缘检测方法,即对 zig-zag 序列中前几个交流分量的幅度进行判别,如果其中某个系数的幅度大于一个阈值,则认为该分块内包含边缘,从而不用于水印的嵌入.这里,将用于判别的交流分量数目由文[2]中的 3 个增加到 5 个,其目的是尽可能将所有边缘都检测出来,虽然会导致一些不含有边缘的纹理分块被误划进去,但这样的代价是值得的.

由于是在已经压缩过的视频上进行水印嵌入,因此只要充分利用人眼视觉特性,嵌入位置选择得当,不仅可以保证主观视频质量不受影响,同时被修改的 DCT 系数,虽然位于中高频,但却是经过量化后非零的系数,因此从嵌入系数的选择上来看,已经具有相当的鲁棒性.由于通常的消费电子产品如机顶盒等,其计算能力有限,因此,水印的嵌入算法应当简单易行,以占用尽可能少的资源.水印的嵌入算法,应通过对 MPEG2 的码流结构进行修改即可完成,从而避免完全的解码和重新编码.通过 3.1 节中的分析,可以看出,为了获得 DCT 分块的各种信息,如是否边缘,活动性等,对码字扫描以进行变长解码是必须的,而只要同时将原来该分块的码流仍然保存在缓冲区中,届时对相应位置的码字进行修改(正/负号的变化)或插入 $(F(i, j))$ 由零变为非零)即可.这种方法,其复杂度主要增加在获取 DCT 分块信息所用的计算上.

3 水印的检测

3.1 水印序列的提取

对于数字录像机,机顶盒等设备,如果水印用于拷贝控制,则其检测可以在 MPEG2 码流上进行.检测的过程是,首先对码流扫描,进行变长解码,然后进行边缘判断,对于非边缘的 DCT 分块,判断指定位置 j 处 DCT 系数的正负,如果系数为正,则该位置对应的水印比特为 1,否则为 -1.如果该位置系数为 0,或处于边缘分块,即在此位置不能用于后继的判别,令水印 bit 为 0.对于每一 I 帧,我们可以得到一个检测出的包含 $\{-1, 0, 1\}$ 的序列 w .

如果输入为解码后的复合视频信号,那么经过 A/D 变换后,直接得到的是 YUV 亮度信号.水印的提取则需要对 Y 分量的每帧进行分块 DCT 变换以判断相应 DCT 系数的正负.但是,并不需要计算出每个 DCT 系数,假设水印是嵌入在第 j 个系数上的,只需要计算第 j 个系数的 DCT 变换以及用来进行边缘判断的 5 个 DCT 系数即可.

3.2 动态调整门限的相关检测器

每一个 I 帧中检测出的水印序列 w ,将被送入相关检测器以判断与原始水印 w 的相似程度.令

$$= \frac{\sum_{m=1}^l w(m) w'(m)}{\sum_{m=1}^l w(m)^2} \quad (5)$$

l 为检测出的水印长度,其中不为零的 bit 数目为 l ,我们称

l 为检测得到的水印有效长度. 当 $l >$ 门限 时, 认为水印存在于该帧中.

根据假设检验的规则, 当 l 足够大时, 根据中心极限定理, 趋近于高斯分布, 可以计算出此时的误判概率.

$$P_{fp} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{l}{2}} \right) \quad (6)$$

在数字视频的应用环境中, 保持一个极低的 P_{fp} 尤为重要. 而实际判决过程中, 由于视频的每帧图像特性各不相同, 实际嵌入水印的位置和数目也各异. 因此, l 是一个时间的变量. 令

$$P_{fp}(t) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{l(t)}{2}} \right) \quad (7)$$

我们以误判概率 $P_{fp}(t)$ 作为约束准则, 固定 $P_{fp}(t)$, 以此来确定每一帧所用的判决门限.

$$l(t) = \operatorname{erfc}^{-1} (2 P_{fp}(t)) \cdot \sqrt{\frac{2}{l(t)}} \quad (8)$$

当 $l(t)$ 长度较长时, 相应的检测门限 $l(t)$ 就低, 当输入的视频码流压缩率较低时, 一般其 $l(t)$ 较小, 此时为保证固定的 P_{fp} , 则必须提高检测门限. 否则, 会导致合法的时移拷贝不能进行或者拒绝播放视频等可能导致用户投诉的事件发生. 根据上式, 我们动态的决定检测门限. 当 $P_{fp}(t) = 10^{-8}$, 水印长度小于 31 时, 阈值大于 1, 这是归一化相关检测器无法达到的输出, 此时, 将判断为水印不存在.

为增加检测的准确性, 可以对时间轴去累积检测结果, 例如对 100 帧内的检测结果进行平均, 以确定这一个时间段内是否有水印存在. 对于指纹的应用, 检测时可以使用原始视频来对几何攻击进行校正, 用于视频的几何变化常见的有尺寸变化和裁剪, 平移等. 对于无法获得原始视频的场所, 则可以通过频域模板来进行同步, 限于篇幅, 这将另文论述.

4 实验结果及讨论

实验中使用符合 CCIR601 的视频序列用于测试, 视频为 720 × 480 大小, 4:2:0 格式, 首先压缩为 8Mbit/s 具有演播室质量的 MPEG2 码流, 然后将水印嵌入其中. 我们选择在每个 DCT 分块中使用 2 个系数嵌入水印, 其在 zigzag 顺序中的序号由密钥控制. 迭加水印后的视频序列, 解码后显示, 无明显主观失真. 在实验所选的序列中, 每一 I 帧中, 大约有 5% ~ 10% 在上述所选系数的位置上被嵌入水印, 因此水印对视频序列质量的影响是很小的.



图 2 原始视频和嵌入水印后的视频

检测时令 $P_{fp}(t) = 10^{-8}$. 如果直接对嵌入水印后的视频码流进行水印检测, 相关检测器的输出结果为 1, 远远高于阈值, 例如, 对于第一个 I 帧, 其检测阈值为 0.203, 从而保证在低的误判概率下实现水印的检出.

视频处理中, 最常见的是编码. 本文的水印, 对于 MPEG2 重新编码, 具有良好的鲁棒性. 图 2(a) 是对视频序列进行解码后再重新压缩所得的检测结果. 重新压缩后的码流比特率分别为 8Mbits 和 2Mbits. 相关检测器的输出结果恒定为 1, 但是, 随着码率的降低, 检测出的水印序列中, 非零比特的数目也减小, 这是因为, 压缩的主要效应是将非零的 DCT 系数量化为 0. 此时, 为保持一定的误判概率, 检测器的阈值也随之动态提高. 但是, 相关输出始终高于阈值, 从而保证水印的检出. 一般的, 数字视频节目的码率应在 4Mbit/s 以上, 以保证质量, 2Mbits 的 CCIR601 视频一般观赏质量较差, 失去了商业价值. 因此, 本文的方法完全能够满足通常的压缩要求. 而且水印检测可以在 MPEG2 解码后进行, 例如播放控制的场合, 那么重新压缩时采取不同的 GOP 结构对水印检测没有影响. 本文的方法, 对平滑, 噪声等都具有较好的鲁棒性, 例如对解码后的视频序列进行 3 × 3 均值滤波后进行 8Mbit/s MPEG2 编码, 再进行检测的结果, 水印能够被正确检测出来. 由于 DVB 的高质量要求, 因此那些严重影响视频保真度的攻击在这里不加以考虑.

图 2(b) 是本文算法相对于 MPEG2 运算的时间, 所用视频长度为 50 帧. 算法所用时间是 MPEG2 解码运算的 12.8%, 而文[3,5]中的结果分别是 MPEG2 解码时间的 130% 和 50%. 可见, 本文的算法具有更低的复杂度, 并且易于在终端系统上实现.

5 总结

本文分析了数字视频广播中水印技术的应用, 针对拷贝与播放控制, 用户追踪等需求, 提出了一种 MPEG2 域的视频数字水印算法, 利用 DCT 系数的符号关系实现水印的嵌入, 并与 MPEG2 码流相兼容, 相对其它的方法, 其嵌入算法计算复杂度低且易于在 DVB 的接收终端中实现, 在良好保持视频质量的同时, 具有足够的鲁棒性以满足需要. 在此基础上, 可以以帧为单位, 将该算法扩展成为一种数字指纹的嵌入方法, 以实现用户对用户的追踪和识别.

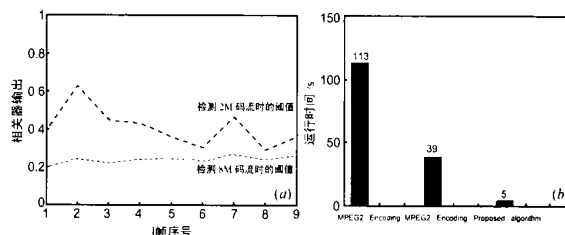


图 3 实验结果

(a) 8Mbit/s 和 2Mbit/s MPEG2 压缩; (b) 与 MPEG2 运算时间的比较

作者简介:

邵亚非 男, 1974 年 10 月生于江苏, 1998 年本科毕业于清华大学电子工程系, 现为该系博士研究生, 研究方向为数字水印技术, 数字视频广播与条件接收, 宽带网接入.

吴国威 男, 1935 年 1 月生于浙江, 1958 年毕业于清华大学电子工程系, 现为清华大学电子工程系教授, 研究的方向为信号与图像处理, 数字视频广播等.

(下转第 1561 页)

quantization[J]. IEEE Trans ,1994 ,COM - 42 (2) :208 - 210.

- [5] K T Lo ,W K Cham. Subcodebook searching algorithm for efficient VQ encoding of images[J]. IEE Proceedings-I,1993 ,140(5) :327 - 330.
- [6] L Guan ,M Kamel. Equal-average hyperplane partitioning method for vector quantization of image data [J]. Pattern Recognition Letters , 1992 :693 - 699.
- [7] K S Wu J C Lin. Fast VQ encoding by an efficient kick-out condition [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology , 2000 ,10(1) :59 - 62.

作者简介:



刘春和 男,1965 年生于吉林省辉南县,1985 年和 1994 年分别获得学士和硕士学位,现为哈尔滨工业大学自动化测试与控制系博士研究生,目前主要致力于图像处理研究。



和信息安全等领域的研究。

陆哲明 男,1974 年生于浙江省东阳市,1997 年和 2001 年获得哈尔滨工业大学硕士学位和博士学位,现为哈尔滨工业大学自动化测试与控制系教授,IEEE 和 SPIE 会员。2003 年获全国优秀博士论文奖,获部级一等奖 1 项,二等奖 1 项,已出版专著 1 部,发表论文 70 篇,其中 SCI 21 篇,目前主要致力于视觉与图像处理、数字水印



孙圣和 男,1937 年生于朝鲜鲜北道,现为哈尔滨工业大学自动化测试与控制研究所所长,教授,博士生导师,电子学会会士,日本 IEICE 会员,获十余项国家级和省部级科技成果奖,已发表 5 本著作和 240 多篇论文,被 SCI 和 EI 收录 140 余篇,培养 3 名全国优秀博士论文奖获得者,目前的研究领域包括计算机自动测试与控制,信号处理和系统辨识。

(上接第 1564 页)

参考文献:

- [1] J A Bloom ,I J Cox ,T Kalker ,etc. Copy protection for DVD video[J]. Proceedings of the IEEE,1999 ,87(7) :1267 - 1276.
- [2] C Busch ,W Funk ,S Wolthusen. Digital watermarking : From concepts to real - time video applications[J]. IEEE Computer Graphics and Applications ,1999 ,19(1) :25 - 35.
- [3] F Hartung ,B Grod. Digital watermarking of uncompressed and compressed video[J]. Signal Processing ,1998 ,66(3) :283 - 301.
- [4] G Langelaa ,R Lagendijk ,J Biemond. Real-time labeling methods for MPEG compressed video[A]. Proceedings of 18th Symposium Information Theory[C]. Vldhoven ,Netherlands :SIT,1997 :15 - 16.
- [5] G Langelaa ,R Lagendijk. Optimal Differential Energy Watermarking of DCT Encoded Images and Video[J]. IEEE Transactions on Image Processing ,2001 ,10(1) :148 - 158.
- [6] F Hartung ,M Kutter. Multimedia watermarking techniques [J]. Proceedings of the IEEE,1999 ,87(7) ,1083 - 1107.
- [7] F Jordan ,M Kutter ,T Ebrahimi. Proposal of a watermarking technique for hiding/ retrieving data in compressed and decompressed video ,ISO/ IEC Doc. JTC1/ SC29/ WG11 MPEG97/ M2281 ,1997.
- [8] F Alturki ,R Mersereau. An oblivious robust digital watermark technique for still images using DCT phase modulation[A]. Proceedings of the 2000 International. Conference on Audio ,Speech And Signal Processing [C]. Istanbul Turkey ICASSP ,2000. 1975 - 1978.
- [9] 邵亚非. 利用边际信息的数字水印技术研究[D]. 清华大学博士学位论文 ,2003 ,7.