

基于 H.264 低比特率视频流的半脆弱盲水印算法实现

曹 华, 周敬利, 余胜生, 苏曙光

(华中科技大学计算机科学与技术学院, 湖北武汉 430074)

摘 要: 本文提出一种基于 H.264 低比特率视频流的半脆弱盲水印方法, 通过在 H.264 特有的帧内预测和运动向量预测中分别嵌入鲁棒水印和脆弱水印, 达到版权保护和内容完整性认证的双重目的. 通过在嵌入强度和预测模式选择的拉格朗日乘子中引入 H.264 量化因子, 增强了水印对重量化编码的抵抗力, 取得更好的率失真平衡, 减小水印嵌入对视频流比特率的影响. 该算法可以实现水印的快速嵌入提取, 满足视频实时处理的要求, 实验结果证明了该算法的有效性.

关键词: 半脆弱盲水印; H.264 低比特率; 拉格朗日函数

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2006) 01-0040-05

Implement of Semi-fragile Blind Watermark Algorithm for H.264 Low Bit-Rates Video Stream

CAO Hua ZHOU Jing-li YU Sheng-sheng SU Shu-guang

(School of Computer Science & Technology of Huazhong University of Science & Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract A novel semi-fragile blind watermark algorithm based on H.264 low bit-rate video stream was proposed in this paper. Copyright protection and content authentication can be achieved jointly by embedding the robust watermark and fragile watermark respectively during the process of interior prediction and motion vector prediction which are characteristic for H.264 standard. Through introducing the quantization factor of H.264 in the embedding and prediction mode choice, the proposed scheme can strengthen the watermarking resistance to video recoding and strike a good rate-distortion balance for the watermark of lower bit-rate video stream, which relieve bit-rates loss from the watermarking embedding. Experimental results also demonstrate that this scheme is very computational efficient during watermarking embedding and extraction.

Key words semi-fragile blind watermark; H.264 low bit-rate; Lagrange function

1 引言

通过在视频数据中嵌入一个不可感知的水印信息, 不仅能够用来识别视频的所有者而且能够验证视频内容的完整性. 半脆弱水印要求对不影响视频内容的正常编辑处理如重量化编码具有鲁棒性, 而对修改视频内容类的恶意攻击则比较敏感. 同时视频水印还需具备盲检功能, 水印的嵌入提取算法应当简单、快速, 以满足视频实时处理的需要.

在已经存在的基于 MPEG-1/MPEG-2 的视频水印方案中, 鲁棒水印往往通过修改帧的 DCT 系数实现嵌入^[1,2], 此时 I 帧采用传统的帧内编码方式, 具有丰富的非零 DCT 系数可以用来嵌入水印, 但是在 H.264 编码中 I 帧采用 4×4 的帧内预测技术, 预测残差中只有很少的非零 DCT 因子, 这就很难用传统方法在 I 帧嵌入水印. 视频脆弱水印一般在 R/B 帧的运动向量中实现^[3,4], 但 MPEG-1/MPEG-2 采用 16×16 或 8×8 的宏块以及半像素的运动估计, 使这种

方法的水印容量在低比特率应用中受到限制. H.264 编码由于采用小至 4×4 的子块和 $1/4$ 像素的运动估计, 此时 P/B 帧中存在大量非零的运动向量可供嵌入水印. 在现有的 H.264 视频水印算法中, David^[5]提出的在 H.264 视频序列嵌入水印的方法具有很强的鲁棒性, 但由于检测时需要原始视频使其实用价值受到限制. Gang Qiu 等^[6]提出的算法在嵌入和模式选择时使用固定的嵌入强度和拉格朗日乘子, 没有考虑量化对水印的影响, 使水印很难抵抗视频重量化处理, 水印视频不能达到良好的率失真性能.

在分析现有这些算法的基础上, 本文提出的半脆弱水印算法在 H.264 编码的时候将鲁棒水印嵌入到 I 帧的预测残差中, 将脆弱水印嵌入到 P 帧的运动向量中, 实现版权保护和内容完整性认证的双重目的. 在嵌入强度和模式选择拉格朗日乘子中引入量化因子, 增强了水印抵抗重量化处理的能力, 改善了水印视频的率失真性能. 该算法嵌入提取水印的计算复杂度很低, 能够满足视频实时处理的需要.

式将产生不同的水印残差块, 由于残差最小的块有时反而会需要更多的比特去编码, 造成视频比特率增加太多。为了选择具有最佳率失真性能的水印块, 通过最小化拉格朗日函数来选择最佳预测模式的水印块, 如式 (2):

$$J_{\text{MODE}}(\lambda_i) = \min \{ \text{distortion}(W_i^*) + \lambda_i \cdot \text{rate}(W_i^*) \} \quad (2)$$

式中 $\text{distortion}(W_i^*)$ 代表水印块预测残差绝对值总和, $\text{rate}(W_i^*)$ 代表水印块残差将在随后被编码的比特数, 这可以通过查找码表取得, λ_i 为拉格朗日乘子, 用以在比特率和失真之间寻找一个平衡点。根据 Wiegand 等^[9]对 H. 264 率失真性能的分析, 本算法在拉格朗日乘子中引入 H. 264 量化因子 QP , 按下式对拉格朗日乘子取值:

$$\lambda = \sqrt{0.85 \times 2^{QP/6}} \quad (3)$$

在同一个拉格朗日乘子的作用下, 不同模式的水印块将产生不同的拉格朗日代价, 其中最小拉格朗日代价所代表的模式就是具有最佳率失真平衡性能的水印块预测模式。

2.2 运动向量预测及其水印嵌入

H. 264 同样使用基于块的运动估计预测补偿机制, 它使用树形构造的运动补偿 (Tree structured motion compensation) 方法来划分宏块, 支持从 16×16 到 4×4 尺寸范围的子块, 更小的子块有助于提供更精确的运动信息, 减少方块效应, 提高图像质量; 此外 H. 264 使用更高精度的分像素运动向量 (在亮度块中为 $1/4$ 像素, 在色度块中为 $1/8$ 像素), 运动向量位移的精度越高, 则预测残差越小, 传输码率就越低, 更小的子块划分也使得 H. 264 视频流中运动向量的数目大幅增加, 有利于在其中嵌入更多的水印信息。

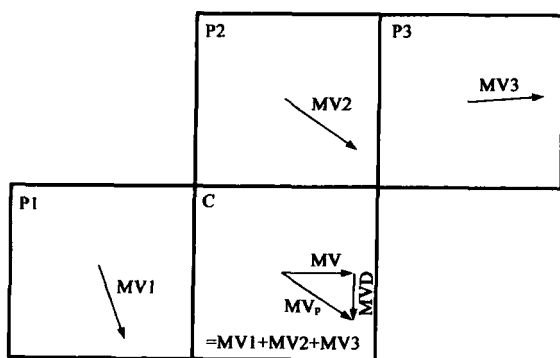


图 5 相邻块运动向量的数据相关

为了进一步降低传输码率, H. 264 采用了运动向量预测技术, 这是因为直接编码每一个子块的运动向量将占用大量的比特, 特别是在采用更小的块时更是如此, 这对降低码率是极为不利的。运动向量预测的基本依据是相邻子块的运动向量往往是高度相关的, 如图 5 所示当前编码块 C 的运动向量可以由相邻的已编码块 P1、P2 和 P3 的运动向量预测取得, 基本算法是取相邻子块运动向量的中间

值。如果 MV_p 是由邻近块运动向量计算出来的预测向量, 则最后被编码传输的是当前子块运动向量 MV 和预测向量 MV_p 的残差 MVD , 而不是当前编码块的运动向量 MV 本身。

通过对 Song 算法^[4]的分析改进, 本文提出的脆弱水印嵌入可在亮度块的运动向量预测中实现, 其过程可描述如下:

首先通过运动估计 (ME: Motion Estimation) 得到每一个子块的运动向量, 在 H. 264 中亮度块采用 $1/4$ 像素精度的运动估计, 对于每一个子块, 运动搜索过程首先覆盖整数点位置, 然后是围绕最佳整数位置的半像

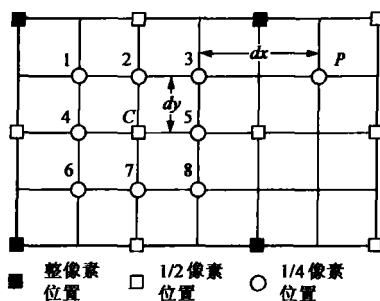


图 6 $1/4$ 像素运动估计搜索图

素位置, 最后是围绕最佳半像素位置的 $1/4$ 像素位置。在搜索的过程中 $1/2$ 像素位置运用 6-tap 滤波器进行运动补偿, $1/4$ 像素位置运用中值滤波进行运动补偿, 从而得到各预测位置的运动补偿块, 通过比较各运动补偿块与当前块的残差决定最佳的预测像素位置, 即得到运动向量。

在上述搜索过程中, 考虑到比特率和失真因素寻找最佳运动向量的准则同样是最小化拉格朗日函数, 如式 (4):

$$MV_{\text{MODE}} = \min \{ \text{distortion}(mv) + \lambda_p \cdot \text{rate}(mv - mvp) \} \quad (4)$$

这里 mv 代表当前候选的运动向量, mvp 表示从相邻块预测的运动向量, λ_p 是运动估计中在比特率和失真之间寻找平衡的拉格朗日乘子, 仍然根据引入 H. 264 量化因子的式 (3) 对其取值。 $\text{distortion}(mv)$ 为当前候选运动向量产生的运动补偿块与当前块的残差的失真度量, $\text{rate}(mv - mvp)$ 表示需要编码的运动向量预测残差 $MVD = [dx, dy]^T$ 的比特数。

在本方案中水印信息被嵌入到运动向量预测残差 MVD 的水平偏移量 dx 或垂直偏移量 dy 中, 由于 $MVD = mv - mvp$, 因此通过修改运动向量 mv 使得 MVD 的水平或垂直偏移量为奇数或偶数来标记不同的水印信息, 具体实现方法可举例说明如下:

在图 6 所示的 $1/4$ 像素运动估计搜索图中, 假定要将水印信息 $w_n \in \{0, 1\}$ 嵌入到 MVD 的水平偏移量 dx 中, C 是当前子块的最佳 $1/2$ 像素位置, $\{1, 2, \dots, 8\}$ 是围绕 C 的候选 $1/4$ 像素位置, P 是由相邻子块得到的预测向量, 那么如果 $w_n = 1$ 则当前候选的运动向量 mv 取自位置 $\{1, 3, 4, 5, 6, 8\}$, 因为这 6 个位置与 P 的水平偏移量为偶数, 如果 $w_n = 0$ 则 mv 取自位置 $\{2, 7\}$, 此时这 2 个位置与 P 的水平偏移量为奇数, 换句话说, 如果嵌入比特为 “1”, 运动估计

过程搜索运动向量预测残差 MVD 水平偏移量 dx 为偶数值的位置, 如果嵌入“0”则搜索 dx 为奇数的位置, 搜索的准则依然是根据式 (4), 只不过候选运动向量的范围受到限制, 以上过程可以看作是受嵌入规则限制的运动估计过程, 最后残差块按通常算法进行 DCT 变换和量化编码。

2.3 水印提取方法

通过以下步骤从 H. 264 压缩视频流中提取水印:

Step 1 H. 264 压缩视频流被部分解码得到 I 帧的量化 DCT 系数和 P 帧的运动向量预测误差 MVD 。

Step 2 对 I 帧每一个嵌入点包含 DCT 系数的水印块当对应的 DCT 系数 $AC_w \neq 0$ 时, 水印比特 $w_i = 1$ 否则 $w_i = 0$ 。

Step 3 对 P 帧的每一个嵌入点包含 MVD 的水印块按 $w_i = d_i \bmod 2$ 提取水印信息。

本算法的水印提取不需要原始视频, 实现了盲检测, 从以上步骤可以看出本文的水印嵌入方法在提取的时候非常简便, 具有很好的计算效率。

3 实验和分析

利用 H. 264 参考软件 JM 9.8^[10] 实现本文提出的水印算法, 实验中使用的视频序列是 QCIF 格式 (176 × 144) 的 *foreman* 和 *akiyo* 测试序列长度为 30 帧, 按 BP 的顺序编码。水印嵌入到 I 帧、P 帧的亮度分量中, 对 QCIF 的帧来说总共有 99 个 16 × 16 的宏块 (176/16 × 144/16 = 99), 在每一个宏块中选择一个固定位置的 4 × 4 子块嵌入 1 比特水印信息, 从而将水印信息扩展到整个帧中, 使用两个长度为 99 比特的 {0, 1} 伪随机序列分别重复嵌入到每一个 I 帧、P 帧中。在 I 帧的 16 × 16 宏块中, 水印嵌入到第 6 个 4 × 4 的子块中, P 帧的脆弱水印嵌入到 1/4 像素运动向量预测差值的水平分量中, 检测时也是重复从每一个帧中提取水印。

图 7 是两个测试序列 *foreman* 和 *akiyo* 在不同嵌入强度下的水印视频帧, 从视觉上几乎看不出和原始视频有什么明显差别, 图 8 是两个测试序列用 2 个不同的量化参数 $QP = [28, 40]$ 编码, 用不同的强度嵌入水印和未嵌入水印引起的率失真变化, 从中可以看出, 当嵌入水印导致两个序列的率失真性能产生损失时, *akiyo* 序列的质量降低更加明显, 这是因为 *akiyo* 比 *foreman* 包含更多的平坦区域, 其高频区域的原始系数大部分为零, 在此嵌入水印导致视频质量的降低, 而由于 *foreman* 序列比 *akiyo* 序列包含更多的运动信息, 在 P 帧运动向量预测中嵌入水印导致 *foreman* 的比特率有较大幅度的增加, 但总体上在嵌入强度 $a = 5$ 时, 视频质量最大下降约 1.4 dB, 比特率增加约 6%, 水印视频仍然具有较好的率失真性能。

为了进一步评估水印的性能, 根据式 (5) 计算提取的水印比特与嵌入的水印比特的相似度 Sim :

$$Sim = \frac{W_D}{W_E} \quad (5)$$

这里 W_D 为每一帧嵌入的水印比特总数, 本实验中其值为

99 W_D 是从每帧约定的嵌入位置正确提取的水印比特数, $W_D \leq W_E$, $Sim = 1$ 代表嵌入的水印信息全部被正确检测出来, 对于鲁棒水印, 要求水印视频受到各种攻击后, 仍然能够较完整地提取出嵌入的水印信息, 因此 Sim 的值越大, 受攻击后 Sim 的变化越小, 代表水印的鲁棒性越强, 而对脆弱水印来说, 要求水印视频受到轻微的处理就使嵌入的水印产生明显的变化, 据此判断视频是否受到了攻击, 因此 Sim 值越小, 受攻击后 Sim 的变化越大, 代表水印的脆弱性越强。

为了检验嵌入到 I 帧、P 帧的水印经过视频重编码后的性能, 用不同的量化因子对水印视频进行重编码, 从 I 帧、P 帧提取水印的 Sim 值显示在表 1、表 2 中 (表中未列出未嵌入水印的 B 帧), 原始水印视频 $QP = 28$ 嵌入强度 $a = 5$ 从中可以看出, 由于嵌入过程中引入了量化因子, 水印视频重量化编码后的 I 帧中提取的水印有很高的 Sim 值, 显示出嵌入到 I 帧的水印有很好的抗重编码能力, 由于水印被重复地嵌入到每一个 I 帧, 因此一段视频序列总可以通过提取出有较高 Sim 的 I 帧水印来判断视频的所有者。

表 3 是水印视频受常见的滤波和椒盐噪声攻击后从 I 帧、P 帧提取水印的 Sim 值测试结果, 其 Sim 值为所有同类帧 Sim 值的平均值。



图 7 嵌入水印的测试序列 (I 帧编码 $QP = 28$) 从左至右嵌入强度 $a = [1, 3, 5]$

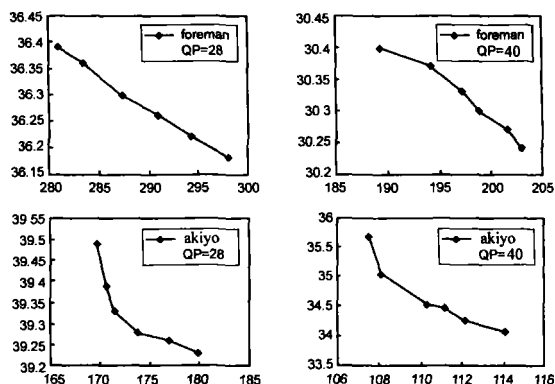


图 8 测试序列在 $QP = [28, 40]$, 未嵌入水印和嵌入强度 $a = [1, 2, 3, 4, 5]$ 的水印视频率失真曲线

表 1 foreman水印序列重

编码提取水印 S_{in}						
量化	帧号 帧类型					
系数	0/I	2/P	4/I	6/P	8/I	
32	1	0.15	1	0.22	1	
36	1	0.13	1	0.16	0.98	
40	0.93	0.09	0.95	0.11	0.92	
	10/P	12/I	14/P	16/I	18/P	
32	0.21	1	0.18	1	0.14	
36	0.11	1	0.13	0.98	0.17	
40	0.07	0.94	0.06	0.94	0.11	
	20/I	22/P	24/I	26/P	28/I	
32	1	0.17	1	0.21	1	
36	1	0.1	1	0.13	0.99	
40	0.92	0.09	0.95	0.08	0.92	

表 2 akiyo水印序列重

编码提取水印 S_{in}						
量化	帧号 帧类型					
系数	0/I	2/P	4/I	6/P	8/I	
32	1	0.11	1	0.13	1	
36	0.96	0.14	1	0.11	1	
40	0.93	0.08	0.92	0.11	0.89	
	10/P	12/I	14/P	16/I	18/P	
32	0.09	1	0.13	1	0.1	
36	0.13	0.98	0.17	1	0.11	
40	0.09	0.89	0.07	0.87	0.1	
	20/I	22/P	24/I	26/P	28/I	
32	1	0.15	1	0.13	1	
36	0.99	0.09	0.97	0.08	1	
40	0.88	0.07	0.91	0.04	0.89	

表 3 水印视频受攻击后提取水印相似度测试

攻击类型	Foreman $QP=28$		Akiyo $QP=28$	
	I帧	P帧	I帧	P帧
未受攻击	1	1	1	1
中值滤波	0.87	0.12	0.94	0.14
椒盐噪声	0.812	0.02	0.875	0.04

从表 1、表 2 水印视频重编码和表 3 对水印视频受滤波、噪声攻击后从 P 帧提取水印的值可以看出, 嵌入到 P 帧运动向量里面的水印具有很强的脆弱性, 当受到常见的攻击如重编码、滤波、噪声处理后, 几乎就检测不到嵌入到 P 帧的水印信息了。由于未受攻击的水印视频检测相似度为 1, 因此通过检测 P 帧嵌入水印的明显变化, 就可以判断视频是否是未受过任何处理的原始视频。

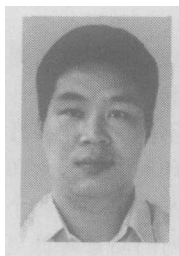
4 结论

本文提出一个针对 H. 264 视频编码标准的水印算法, 对不同的编码帧采用不同的水印嵌入方法, 在 I 帧中将鲁棒水印嵌入到帧内预测的残差中, 将脆弱水印嵌入到 P 的运动向量预测差值中, 嵌入算法结合了 H. 264 编码标准, 将量化因子引入嵌入的过程中, 增强水印对重编码的抵抗性, 实现更好的率失真性能。算法实现的复杂度低, 检测码流时不需对视频完全解码, 有较高的实用性。

参考文献:

- [1] C. Thau, J. L. Wu. DCT-based watermarking for video[J]. IEEE Trans on Consumer Electronics, 1998, 44(2): 239-246.
- [2] F. Jordan, M. Kutter, T. Ebrahimi. Proposal of a watermarking technique for hiding/retrieving data in compressed and decompressed video[R]. Technical report M2281, ISO/IEC document JTC1/SC29/WG11, 1997.
- [3] P. Yin, H. H. Yu. Semi-fragile watermarking system for MPEG video authentication[A]. Proc. IEEE Int. Conf. Acoustics, Speech, and Signal Processing[C], Orlando: IEEE Communications Society, 2002, 4: 3461-3464.
- [4] J. Song, K. Li. A data embedding scheme for H. 263 compatible video coding[A]. Proc. IEEE Int. Symp. Circuits and Systems[C], Spain: IEEE Computer Society, 1999, 4: 390-393.
- [5] David et al. Implementation of a watermarking algorithm for H. 264 video sequence[EB/OL]. <http://www.ep.liu.se/exjobb/isy/2004/3516.html>, 2004-10-16.
- [6] Gang Qiu, P. Marziliano, A. T. S. H. Q. D. He, Q. Sun. A hybrid watermarking scheme for H. 264/AVC video[A]. Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition[C], UK: Cambridge Press, 2004, 4: 865-869.
- [7] ITU-T Rec. H. 264 | ISO/IEC 14496-10 AVC, Draft ITU-T recommendation and final draft international standard of joint video specification[S].
- [8] T. Wiegand, G. J. Sullivan et al. Overview of the H. 264/AVC video coding standard[J]. IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technology, 2003, 13(7): 560-576.
- [9] T. Wiegand. Lagrangian multiplier selection in hybrid video coder control[A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing[C], Thessaloniki, Greece: IEEE, 2001, 4: 221-232.
- [10] H. 264/AVC Joint Model 8.5 (J-M 8.5) [CP]. <http://bs.hhi.de/~suehring/m1/>.

作者简介:



曹 华 男, 1971 年 2 月生于湖北武汉, 现为华中科技大学计算机科学与技术学院博士研究生, 主要研究方向: 图象处理和视频编解码、数字水印。E-mail: caohua226@163.com.

周敬利 女, 1946 年 3 月生于湖南长沙, 现为华中科技大学计算机科学与技术学院教授, 博士生导师, 主要研究方向: 高性能存储技术及系统、多媒体数据处理与通讯。

余胜生 男, 1944 年 2 月出生于江西南昌, 现为华中科技大学计算机科学与技术学院教授, 博士生导师, 主要研究方向: 多媒体系统技术、计算机接口技术。

苏曙光 男, 1975 年 7 月生于湖南临湘, 现为华中科技大学计算机科学与技术学院博士研究生, 研究方向: 计算机网络技术、视频编解码和图象处理。