

# 基于 H.264 与新一代视频编码标准的 压缩域视频水印综述

朱新山<sup>1,2</sup>, 杨璐<sup>1</sup>

<sup>1</sup>天津大学, 电气自动化与信息工程学院, 天津 300072;

<sup>2</sup>中国科学院信息工程研究所, 信息安全国家重点实验室, 北京 100093

**摘要** 数字水印技术为视频传输、视频共享以及一些扩展视频服务中存在的诸多问题提供了一种有效的解决途径, 属于信息隐藏领域, 它的基本思想是通过在数字媒体信号中嵌入一定量的附加信息, 例如作品的所有权、使用权或者公司的标识等, 实现信息管理或保护的目的。H. 264 是当前广泛使用的视频编码标准, 它采用混合编码框架, 包括帧内预测、帧间预测、变换、量化、自适应熵编码等模块。视频信号的数据量庞大、带宽高、冗余信息多, 基本上都是以压缩的格式存储的特性, 使得在视频中嵌入数字水印更为困难。这些特征使得视频水印在水印容量、水印复杂度以及结合压缩域处理操作等方面的要求比其他多媒体信号更高, 因此, 视频水印除了要满足数字水印的一般要求, 如安全性、鲁棒性、隐藏性等特性之外, 还有一些独特的技术要求。本文对压缩域视频水印相关技术进行了分析并对研究方法进行了讨论, 提出了目前存在的问题及未来研究的方向。

**关键词** H.264; 视频水印; 失真漂移

中图分类号 TP309.7 DOI号 10.19363/J.cnki.cn10-1380/tn.2018.11.03

## Overview of compressed domain video watermarking based on H.264 and new generation video coding standards

ZHU Xinshan<sup>1,2</sup>, YANG Lu<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Tianjin University, School of Electrical and Information Engineer, Tianjin 300072, China

<sup>2</sup> Institute of Information Engineering, Chinese Academy of Sciences, State Key Laboratory of Information Security, Beijing 100093, China

**Abstract** Digital watermarking technology provides an effective solution for video transmission, video sharing and some problems in extended video services. Digital watermark belongs to the field of information hiding. Its basic idea is to realize the purpose of information management or protection by embedding a certain amount of additional information in the digital media signal, such as the ownership of the work, the right to use or the logo of the company. H. 264 is a widely used video coding standard, which uses a hybrid coding framework, including intra prediction, inter prediction, transform, quantization, adaptive entropy coding and other modules. Video signals have a large amount of data, high bandwidth, and redundant information. They are basically stored in a compressed format, making it more difficult to embed digital watermarks in video. These features make the video watermark higher in terms of watermark capacity, watermark complexity and combined compression domain processing operations than other multimedia signals. Therefore, in addition to the general requirements of digital watermarking, such as security, robustness, and concealment, video watermarking has some unique technical requirements. In this paper, the compression domain video watermark related technology is analyzed and the research methods are discussed. The existing problems and future research directions are proposed.

**Key words** H.264; video watermark; distortion drift

### 1 引言

计算机和宽带互联网技术的飞速发展, 将人们

期盼已久的高品质视频传输和在线观看变成现实。许多视频网站, 如优酷、搜狐、爱奇艺、YouTube、DailyMotion 等, 都提供在线观看和下载视频的业务,

再加上各种便携设备的广泛应用,例如 iPod、PSP、Zen 等,使人们随时随地都可以播放视频。不仅如此,随着家庭影院的普及,同步院线将给人们提供更高级的视听享受和娱乐体验。视频逐渐成为大众交流和娱乐的主要承载形式。数字视频业务拥有巨大的市场价值。据中国互联网络信息中心的调查显示,截至 2017 年 12 月,中国网络视频用户量超过 5.78 亿,网络视频使用率为 75%,手机视频用户量超过 5.48 亿,移动视频使用率超过 72.9%;与 2016 年底相比网络视频用户量增长 6.3%,手机网络视频用户量增长 9.7%;2017 年国内网络视频用户付费比例达到 42.9%,比 2016 年增长 7.4%。在庞大又快速增长的视频业务需求背景下,发展保护视频防止恶意使用的技术,有效的视频搜索技术,为高级用户提供优质服务的安全技术,传输错误恢复的可靠技术等等,是我们必须为视频未来思考的问题。

数字水印技术为视频传输、视频共享以及一些扩展视频服务中存在的诸多问题提供了一种有效的解决途径,是建设现代传媒信息综合内容管理平台必不可少的技术支撑。数字水印属于信息隐藏领域,它的基本思想是通过在数字媒体信号中嵌入一定量的附加信息,例如作品的所有权、使用权或者公司的标识等,实现信息管理或保护的目的。H.264 是当前广泛使用的视频编码标准,它采用混合编码框架,包括帧内预测、帧间预测、变换、量化、自适应熵编码等模块。它的继任者 H.265 采用了相同的编码框架,但是几乎在每个模块上都引入了新技术,例如,增加帧内预测模式,采用双向帧间预测、修改整数离散余弦变换矩阵、引入整数离散正弦变换等,这使得编码效率以及错误率都有了很显著的改善。

与其他数字媒体信号相比,在视频中嵌入数字水印更为困难,这是由视频序列本身的特征造成的。视频信号的数据量庞大、带宽高、冗余信息多,基本上都是以压缩的格式存储的。这些特征使得视频水印在水印容量、水印复杂度以及结合压缩域处理操作等方面的要求比其他多媒体信号更高,因此,视频水印除了要满足数字水印的一般要求,如安全性、鲁棒性、隐藏性等特性之外,还有一些独特的技术要求,具体如下:

1) 实时处理性。视频水印的嵌入和提取过程应具有低复杂度,能够实现实时嵌入、提取或检测水印。然而不同的应用有不同的要求,如果水印是用于审计追踪,每个接收端都必须提取水印,则水印应该易于提取。如果为不同的接收者嵌入身份标识水印处理在大量的分布视频序列上进行,而水印提取只是在出现版权冲突时才进行,那么考虑到对水印

所有可能的攻击,水印提取算法可能比较复杂,水印嵌入的复杂度应该降低。

2) 随机检测性。是指在视频的任何位置,都能在短时间内检测出水印。不论视频跳转到什么位置,水印都能在很短的时间内被检测出来,这就比实时性的要求更高。

3) 与视频编码标准相结合。由于视频数据具有数据量大、冗余度高等特点,故在其存储、传输过程中通常要先进行压缩编码处理。很显然,若要在压缩视频流中嵌入水印,就必须要与视频压缩编码标准相结合。水印嵌入是利用视频中的冗余数据来携带水印信息的。如果不考虑视频压缩编码标准而盲目地嵌入水印,由于视频压缩编码需要去除视频中的冗余数据,则嵌入的水印很可能在编码过程中完全或大部分丢失。

4) 盲提取水印方案。根据是否需要原始信号参与水印的提取过程可将水印提取方案分为盲水印提取和非盲水印提取。在视频水印中,虽然使用原始视频信号更有利于检测和提取水印信息,但也增加了将原始视频信息暴露给恶意攻击者的风险,而且很多情况下,人们并不能获得原始视频信号。这就要求在视频水印提取技术的研究中,研究者要更多的将研究重心放在盲提取视频水印上。

视频信号的特性使得视频水印必须采用特殊的技术才能满足上述要求,相关技术将在下文做详细论述。

## 2 压缩域视频水印的原理

在现有的视频压缩编码标准中,H.264 与新一代视频编码标准采用了大量新技术,相比其他编码标准有更高的效率,所以得到了广泛的应用,基于 H.264 与新一代视频编码标准的压缩域视频水印技术的研究也成为热点。本节将结合 H.264 视频编码标准阐述压缩域视频水印的原理。

从本质上讲,数字视频就是一系列内容连续的按时间顺序排列而成的静止图像,所以在视频中加入水印也就是在一系列图像中加入水印,但是由于视频信号的高冗余特性,使得视频水印相比于图像水印更为复杂,所用到的技术也有许多不同。

H.264 中的数据结构如下图 1 所示:

一个视频序列由多个视频帧组成,每帧包含一个或多个像条,每个像条包含整数个宏块,再细分的话还可以分为子块。H.264 中操作都是以这些数据结构为对象的。

H.264 视频编码技术的原理框图见图 2,从图中可看出,视频编码过程中有帧内预测、帧间预测等步骤,这是为解决视频信号的高冗余特性而引入的机制。



术来消除视频帧的空间冗余。当编码图像时, 对于每个  $4 \times 4$  块(除了边缘块特别处理以外)都可用最接近的先前已编码的像素来预测, 就是用该像素所在块的左上角的像素。预测结束后可得到预测宏块 P, 对输入的视频帧当前宏块和预测宏块 P 的差值进行编码, 这样就可以除去相邻块之间的空间冗余度, 取得更为有效的压缩。

预测分为  $4 \times 4$  子块和  $16 \times 16$  宏块两种模式。 $4 \times 4$  亮度子块有 9 种可选预测模式, 独立预测每一个  $4 \times 4$  亮度子块, 适用于带有大量细节的图像编码;  $16 \times 16$  亮度块有 4 种预测模式, 预测整个  $16 \times 16$  亮度块, 适用于平坦区域图像编码。

$4 \times 4$  亮度块预测模式用到的像素和方向如图 3 所示, A~M 是相邻的已编码的像素值, a~p 是  $4 \times 4$  块中要预测的像素值, 0~8 是  $4 \times 4$  块的 9 个预测方向。当  $4 \times 4$

块位于边界, E~H 不可得时, 可用 D 代替。9 种预测方法见图 4。

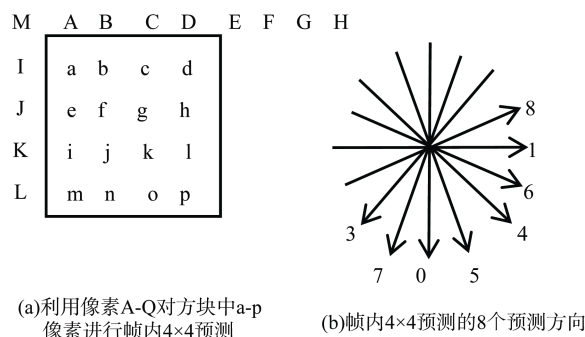


图 3  $4 \times 4$  亮度块预测模式用到的像素和方向  
Figure 3 pixels and directions used in the  $4 \times 4$  luma block prediction mode

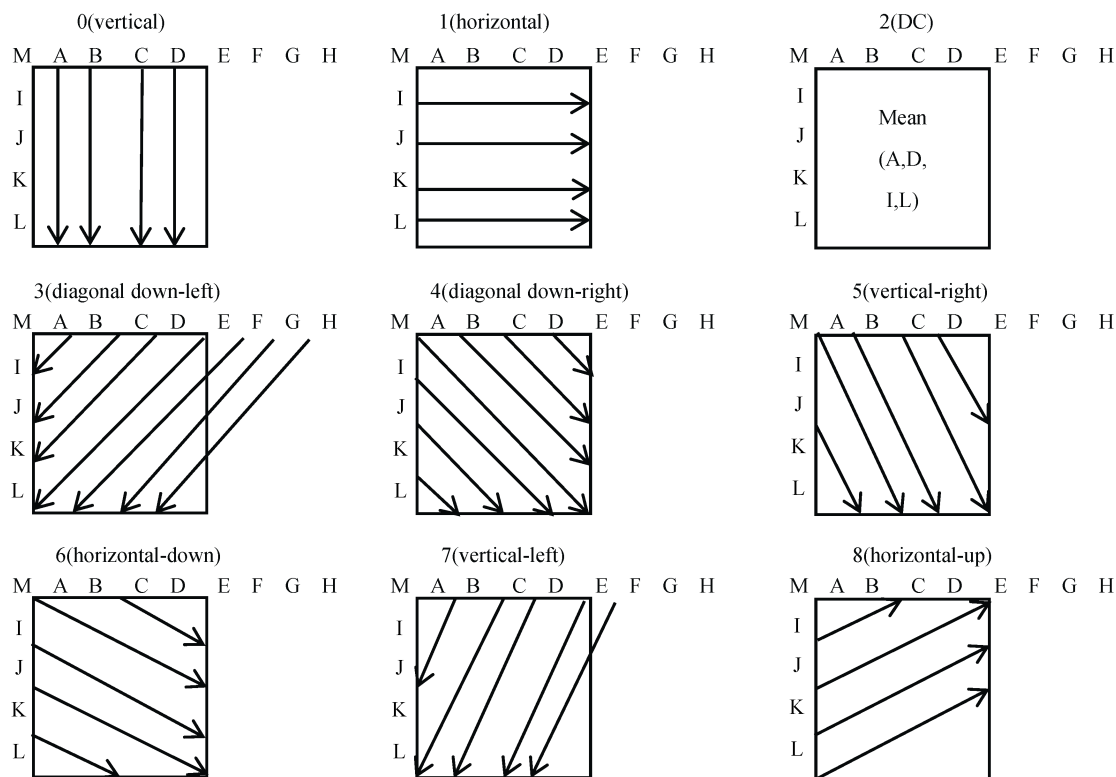


图 4  $4 \times 4$  亮度块 9 种预测模式

Figure 4 9 prediction modes of  $4 \times 4$  luminance block

对于 9 种模式, 简述如下:

- 1) 模式 0: 垂直模式, A~D 下方的像素值分别和 A、B、C、D 像素值相等。
- 2) 模式 1: 水平模式, I~L 右方的像素值分别和 I、J、K、L 像素值相等。
- 3) 模式 2: DC 模式, a~p 的像素值等于 A~D 和 I~L 等 8 个像素值的平均值。

4) 模式 3~8: 方向模式, 对应 6 个梯度方向, 具体预测过程见参考文献[1]。

$16 \times 16$  亮度块预测有四种预测模式, 分别如下图 5 所示:

对于这 4 种模式, 简述如下:

- 1) 模式 0: 直接根据上方的像素 H 预测。
- 2) 模式 1: 直接根据左方的像素 V 预测。

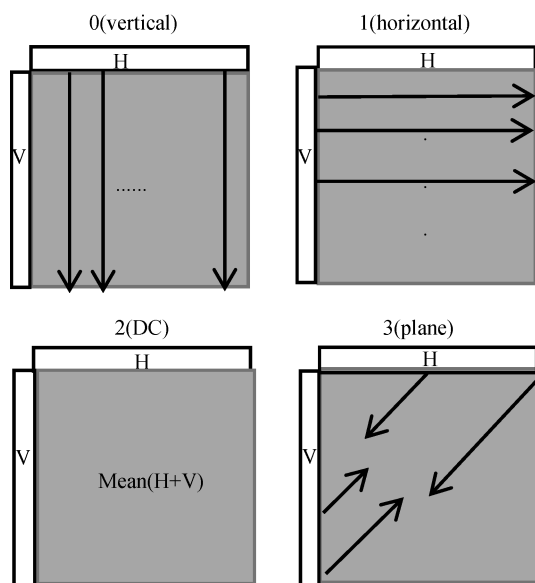


图 5 16×16 亮度块预测模式

Figure 5 prediction modes of 16 × 16 luminance block

3) 模式 2: 根据上方和左方的像素做均值预测。

4) 模式 3: 根据上方和左方的像素用一个线性平面函数做插值预测。

在帧内预测之前, 需要先进行预测模式的选择, 编码器一般选用使当前块和预测块差值最小的预测模式。

## 2.2 帧间预测

在视频编码中, 最主要的冗余信息是时间冗余。在视频序列中, 邻近帧图像间的内容有一定的相关性, 很多情况下, 相邻帧之间的部分像素区域几乎没有差异, 甚至某些帧之间也没有变化, 这就造成了严重的时间冗余。H.264 使用帧间预测技术来消除时间冗余。

帧间预测包括运动估计和运动补偿两个过程。在帧间预测编码时, 我们可以先将当前帧图像分为若干互不重叠的块, 然后按照一定的匹配准则在邻近参考帧中找出与每个块相似度最高的块(即匹配块)的位置, 继而得出两者空间位置的相对偏移量, 该相对偏移量就是所谓的运动矢量, 得到运动矢量的过程就是运动估计。由运动估计得到的运动矢量对参考帧图像做位移, 求出对当前帧的估计, 该过程为运动补偿。

运动估计和运动补偿过程能很好地解决时间冗余问题。关于运动估计和运动补偿的算法有很多, 具体可参考相关文献[1-2]。寻找匹配块的匹配准则有很多, 常用的有最小均方误差准则、最小平均绝

对误差准则、最大匹配像素数等, 可结合实际情况进行选择。

以上是 H.264 中用到的两个最关键技术的简要描述, 现在用公式总结一下这两个技术在编解码过程中的应用。

首先引入定义: 用  $E$  表示预测误差,  $IE$  表示整数 DCT 变换结果, 预测模式用  $A$  表示,  $F$  表示其前一帧中已经恢复的参考帧数据,  $\vec{v}$  表示运动矢量, 被预测块的尺寸为  $S$ ,  $\Omega$  为尺寸集合,  $\pi$  为预测模式集合,  $A \in \pi$ ,  $S \in \Omega$ 。用  $B'$  代表预测块, 原始块用  $B$  表示, 预测块中某位置用  $\vec{P}$  表示。  $f_b(\cdot)$  是提取块的操作,  $\Omega(\cdot)$  表示从  $\Omega$  中取出与指向元素对应的尺寸系数,  $\langle \cdot \rangle$  表示矩阵内积,  $IDCT(\cdot)$  是整数 DCT 变换操作,  $IIDCT(\cdot)$  是逆整数 DCT 变换操作,  $f_q(\cdot)$  是量化操作,  $f_{iq}(\cdot)$  是逆量化操作。

由上述定义可得编码过程的公式描述如下:

1) 根据预测模式得到预测宏块:

$$B_i = f_b(F_i, \vec{v} + \vec{P}, \Omega(S)) \quad (1)$$

2) 提取当前帧中需编码宏块:

$$B_{i+1} = f_b(F_{i+1}, \vec{P}, \Omega(S)) \quad (2)$$

3) 得到预测残差:

$$E = B_{i+1} - \langle B_i, \pi(A) \rangle \quad (3)$$

4) 对预测残差做整数 DCT 变换:

$$IE = IDCT(E) \quad (4)$$

5) 对变换结果进行量化操作:

$$IE_q = f_q(IE) \quad (5)$$

解码过程的公式描述如下:

1) 对编码结果进行逆量化:

$$IE' = f_{iq}(IE_q) \quad (6)$$

2) 对逆量化结果进行逆整数 DCT 变换:

$$E' = IIDCT(IE') \quad (7)$$

3) 由预测模式得到预测宏块:

$$B_i = f_b(F_i, \vec{v} + \vec{P}, \Omega(S)) \quad (8)$$

4) 由预测宏块和逆整数 DCT 变换结果得到参考帧宏块:

$$B'_{i+1} = E' + \langle B_i, \pi(A) \rangle \quad (9)$$

## 2.3 水印嵌入

视频水印原理框图如下图 6 所示, 包括三个过程: 水印生成和嵌入过程、视频攻击过程、水印提取过程。以下将重点说明水印的生成和嵌入过程。

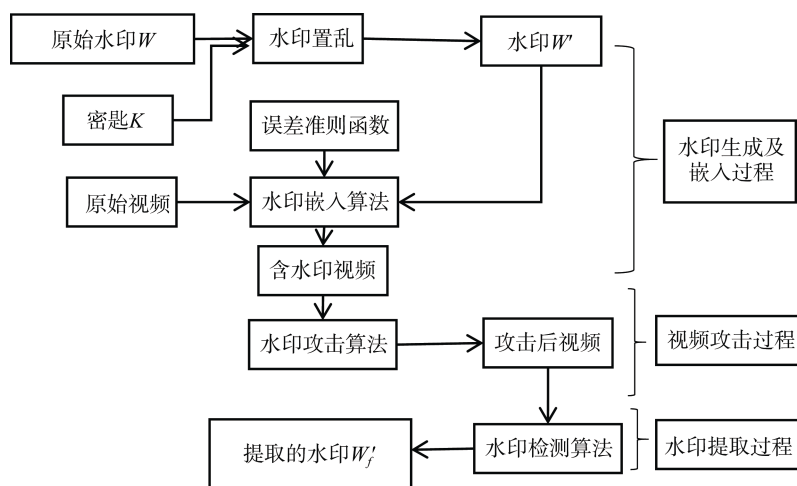


图 6 视频水印原理框图

Figure 6 the block diagram of video watermark

### 2.3.1 水印信号的生成和处理

水印信号可以是能代表版权所有者身份的某种符号、图案或数字。Cox等研究者指出,由高斯随机序列构成的水印信号具有良好的鲁棒性,在许多文献中也都是将高斯随机序列作为水印信号。

若是一般的图像或符号水印,为了增强其安全性,在嵌入之前通常要对其进行预处理,将水印信息置乱。通过一定的数学变换即可得到实际嵌入的水印信号,它们通常是二值化数据。水印的置乱方法有很多种,目前最多的是Arnold变换,IFS模型等。简单介绍一下Arnold变换,其他方法不再赘述。

Arnold 变换俗称猫脸变换。通过如下变换将原水印图像中的 $(x, y)$ 点的灰度值映射到 $(x', y')$ , 其中,  $N$ 为水印图像的高度和宽度:

$$\begin{cases} x' \\ y' \end{cases} = \begin{cases} 1 & 1 \\ 1 & 2 \end{cases} \begin{cases} x \\ y \end{cases} \bmod N, x, y \in \{0, 1, 2, \dots, N-1\} \quad (10)$$

若是采用高斯随机序列做为水印,则不用再经过上述变换过程,直接可将其嵌入在载体信号中。

### 2.3.2 水印嵌入过程

对于压缩域视频水印的嵌入方案,目前的研究中主要有两种:内置式嵌入和后置式嵌入,如图7所示。后置式嵌入是直接在经过熵编码的压缩码流内嵌入水印,不需要解码和再编码过程,因此水印的嵌入对视频信号的影响较小,但视频系统对视频压缩码率的约束将限制水印的嵌入信息量,同时可能引起帧图像运动偏移,也必然对运动补偿环路造成负面效应,因此该类算法具有一定的复杂度;内置式嵌入是在视频编码器中嵌入水印,发生在编码过程中的变换和量化过程。选择在这两个过程中实现水印操作,主要考虑到: 1)变换与量化所涉及的视频内容信息量最大,因此可嵌入水印信息量大; 2)H. 264/ H. 265 对变换与量化后的信息直接进行熵编码,所以水印信息不会遭受额外的损失; 3)水印检测和提取相对方便,只需要对目标码流进行解码和逆量化即可获得加水印的数据,因而降低了水印检测和提取的复杂度。基于这些原因,内置式嵌入方案受到很多研究者的重视。

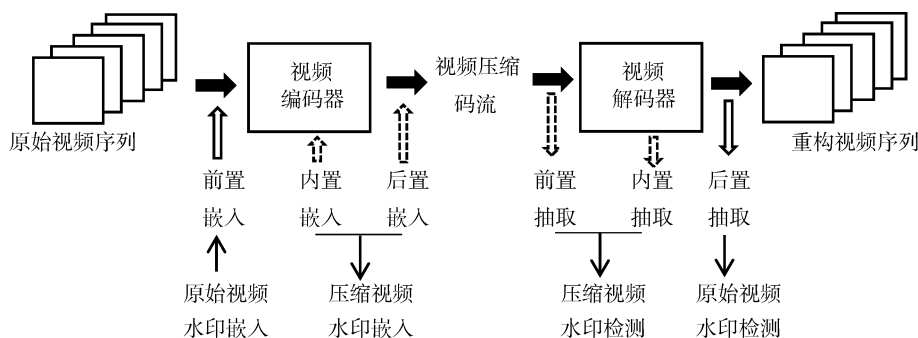


图 7 压缩域视频水印的嵌入方案

Figure 7 embedding scheme of compressed domain video watermark

目前关于H.264视频水印的研究主要集中在将水印嵌入到I帧的DCT系数和P、B 帧的运动矢量中。一般情况下,鲁棒水印选择在DCT系数中嵌入,而脆弱水印选择在运动向量中嵌入。具体过程如下:

1) DCT系数: 将水印嵌入到整数离散余弦变换系数中,这是当前基于H.264标准的压缩域视频水印的主流方法。该方法大概包括以下几个步骤:

a. 对水印信号进行处理。分为两种情况,一种是选择高斯随机序列作为水印信号:一般选择服从正态分布,长度为 $n$ 的随机序列,即 $W = \{X_i, i=0,1,2,\dots,n-1\}$ ,  $n=cK$ ,其中 $c$ 为载体信号每块嵌入的水印子序列长度, $K$ 为载体信号的块数;若选择图像水印,则需要分块并分别做DCT变换,分块数和载体信号分块数相同。以下步骤选择高斯随机序列为水印做说明,图像水印的原理类似。

b. 对预测残差进行分块整数DCT变换。选择在预测残差做DCT变换后的系数中嵌入水印。将预测残差 $f(x,y)$ 分块得到 $K$ 个互不重叠的块,每个块记作 $f_k(x,y)$ ,  $0 \leq k < K$ ,然后分别对每一个 $f_k(x,y)$ 进行整数DCT变换,得到 $F_k(u,v)$ 。

c. 将水印信号嵌入到载体信号的DCT系数中。Cox等研究者提出,水印应放在视觉系统感觉上最重要的分量上。因为感觉上重要的分量是载体信号的主要成分,携带较多的信号能量,在载体信号有一定失真的情况下,仍能保留主要成分。因此,若水印嵌入到感觉上重要的分量,则稳健性较好。感觉上重要的分量就是低频分量,所以应该在经过整数DCT变换的预测残差的每个块的低频系数分量上嵌入水印。对 $b$ 中得到的每个块的DCT系数排序,选择低频的几个系数作为嵌入点,记嵌入点组成的区域为 $\phi_k$ 。按以下公式嵌入:

$$F'_k(u,v) = \begin{cases} F_k(u,v)(1 + \alpha X_i) & , \text{ if } (u,v) \in \phi_k \\ F_k(u,v) & , \text{ if } (u,v) \notin \phi_k \end{cases} \quad (11)$$

其中, $\alpha$ 为拉伸因子,和每个块的性质有关,其值由实验确定。对平均灰度较低的块, $\alpha$ 取值较低,对平均灰度较高的块, $\alpha$ 取值较高。

2) 运动矢量: 运动矢量用来描述不同帧中匹配块之间的偏移量,在一些研究里也会将水印嵌入到运动矢量中。当前关于在运动矢量中嵌入水印的文献不多,需要更进一步的研究。

## 2.4 压缩域中水印嵌入质量

在压缩域视频中嵌入水印等价于修改原始视频数据,这必然会对原始视频数据造成或多或少的损害。那么应该如何度量嵌入水印后视频数据的质

量?当前学术界主要采用以下几个指标:

### 1) 峰值信噪比 PSNR

通常人们用PSNR值来衡量压缩帧与原始帧之间的相似度,从而得出压缩编码对于视频视觉质量的影响。在原始域中嵌入水印的视频,PSNR直接反映水印对原始视频的影响;而在压缩域中嵌入水印的视频,PSNR反映出水印和压缩编码对原始视频的影响。因此,无论采用哪种方法嵌入水印,PSNR都反映水印对视频视觉质量的影响程度,成为衡量视频水印系统性能好坏的一个重要参数。PSNR定义如下:

$$\text{PSNR}(f, w) = 10 \log_{10} \left[ \frac{\max_{\forall(m,n)} f^2(m,n)}{\frac{1}{N_f} \sum_{\forall(m,n)} (f_w(m,n) - f(m,n))^2} \right] \quad (12)$$

其中, $f$ 是原始视频信号, $w$ 是数字水印, $f_w$ 是嵌入水印的视频信号, $(m,n)$ 是某像素点的值, $N_f$ 是 $f$ 或 $f_w$ 像素点的个数。

### 2) 相似系数 $\rho$

数字水印从宿主视频中提取出来后,对各个观察者而言,所提取水印逼真度的好坏取决于各自主观上的看法,具有很大的随意性。对于所提出水印和原始水印,这二者相似到哪一种程度,需要客观的衡量方式。为了评价所提出水印与原始水印的相似程度,一个规格化的相关系数被定义如下:

$$\rho(w, \hat{w}) = \frac{\sum_{n=1}^{N_w} w(n) \cdot \hat{w}(n)}{\sqrt{\sum_{n=1}^{N_w} w^2(n)} \cdot \sqrt{\sum_{n=1}^{N_w} \hat{w}^2(n)}} \quad (13)$$

其中, $w(n)$ 和 $\hat{w}(n)$ 分别是原始水印和提取出来的水印, $N_w$ 是数字水印的长度(比特序列所含有的比特位数)。对于鲁棒水印而言, $\rho$ 值越大越好;而对于脆弱水印, $\rho$ 越小越好。

## 3 压缩域视频水印的研究现状和研究方法

视频水印的研究最早开始于20世纪九十年代末期<sup>[3-4]</sup>。经过二十年的发展,学术界提出了大量的视频水印方案,并在理论与应用方面都取得了相当可观的研究成果<sup>[5-6]</sup>。

根据压缩编码与水印嵌入发生的先后顺序,可将现有的视频水印方案分为两类:1)在压缩之前的原始视频数据中嵌入水印<sup>[7-9]</sup>;2)在压缩的过程中或压缩之后的数据中嵌入水印<sup>[6,10]</sup>。由于已知原始视频数据,第一类水印便于采取抵抗信号压缩与信号处理



过程的方案, 便于控制和评估水印嵌入引起的信号失真, 但是需要耗费很高的计算量。这是因为, 大多数视频都是以压缩格式保存, 必须经过解码过程才能获得原始视频数据。相反, 第二类水印由于不能直接应用原始视频数据, 因此水印设计更加困难。但是, 它可以大大节省计算量, 并容易与压缩过程相结合, 兼顾水印与压缩性能的双重要求。而且, 这种水印可以更方便适用于视频点播、视频压缩以及视频监控等超出传统水印应用范围之外的需求<sup>[11-12]</sup>。随着视频行业的飞速发展, 压缩域视频水印的研究得到了越来越广泛的关注。

### 3.1 面向 H. 264 编码标准的压缩域视频水印的研究概况

通过分析各种学术资源数据库上的检索结果, 可以清楚地看出压缩域视频水印的发展概况。以 Web of Science 数据库为例, 在该数据库上分析与 H. 264 编码标准直接相关的压缩域视频水印文献, 分析结果如图8所示。可以看出, 该方向研究整体可分为三个阶段。2005年之前, 该研究比较少; 2005 年与2010 年之间, 该研究相对增加并保持着相对平稳的规模; 2011 年以后, 该研究相对更加活跃。我们相信, 由于在2013 年公布了 H. 265 视频编码标准, 今后与 H. 26X 编码相关的水印研究会更多。从各个国家出版的文献数量上来看, 我国科研人员在该方向上非常活跃, 发表的文章最多, 其次是美国。欧洲和东南亚的一些国家与地区也都积极开展了此项研究。另外, 可以看到国际上一些著名大学都设立了这一研究方向, 比较有代表性的是美国佐治亚理工大学和新泽西理工学院, 加拿大渥太华大学和哥伦比亚大学、法国电信局科技研发中心、新加坡南洋理工大学等。该方向也得到了国内众多研究机构的重视, 例如湖南大学、宁波工程学院、华中科技大学、哈尔滨工业大学、上海交通大学、西安交通大学、中山大学以及中国科学院等, 都在此方向上取得了一些显著的研究成果。总体而言, 该方向出版文献的数量较少, 研究仍处于起步阶段, 尤其对于新发布的 H. 265, 由于标准细节的差别, 针对已有视频编码标准设计的水印方案不能直接扩展到新的标准上, 因此, 更有一些新的问题需要研究。下面, 我们主要对 H. 264 编码标准相关的压缩域视频水印方案分成几个研究方向进行分析。

### 3.2 面向 H. 264 编码标准的压缩域视频鲁棒水印

压缩域视频鲁棒水印是目前该领域的一个主要研究内容, 影响水印性能的关键因素包括: 1) 水印信

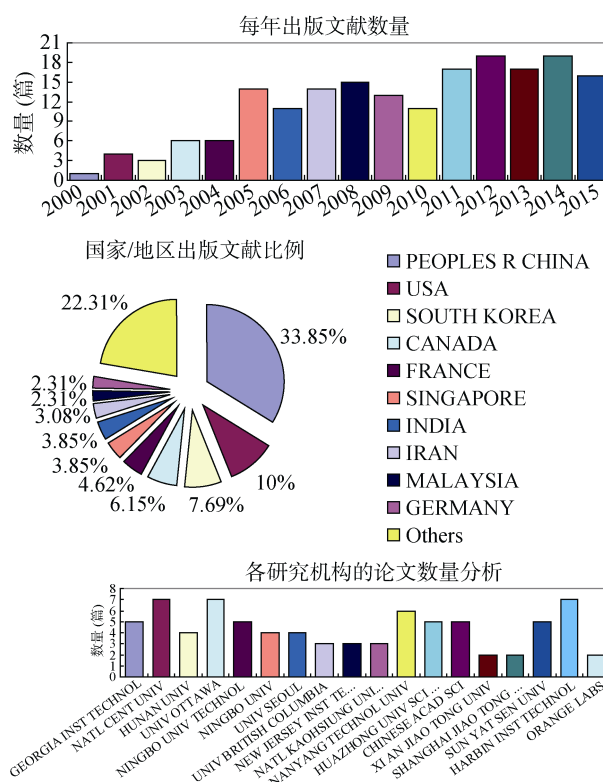


图8 与 H.264 编码标准直接相关的压缩域视频水印的研究情况

Figure 8 research on compressed domain video watermark related to H.264 coding standard

息调制技术; 2) 水印信号嵌入强度; 3) 水印信号嵌入位置。这三个因素分别对应“怎样”嵌入水印, 嵌入“多强”的水印和“在哪”嵌入水印的问题, 它们相互联系, 相互配合, 共同影响水印鲁棒性、不可感知性、水印容量和安全性等水印基本性能。

为了提升水印的鲁棒性, Noorkami 等<sup>[13]</sup>采用扩频水印调制技术将水印嵌入在 I 帧的量化后的交流 DCT (Discrete Cosine Transform, DCT) 系数中, 并且给出了基于似然比测试的水印检测理论。但是, 水印嵌入过程需要获得完全解压缩的视频数据, 而且水印嵌入位置信息需要传送到检测器端才能实施水印检测。文献[14]进一步将该方案扩展用于在 H. 264 编码标准定义的 P 帧中嵌入水印。在该方案中, 水印嵌入位置选择在非零量化值的 DCT 交流系数上, 并且采用了一种不依赖于水印准确嵌入位置的水印检测方案。该方案既可避免视频编码位率的上升, 又增加了水印的嵌入容量。Chen 等<sup>[15]</sup>进一步指出对于采用帧内预测的像素块柯西分布比广义高斯分布能更好的描述其 DCT 系数的统计特性, 并据此提出了一种基于三元假设的水印检测方案, 提升了水印检测精度。Zhang 等<sup>[16]</sup>也提出了一种结合扩频调制技术的



水印嵌入方案, 主要区别在于它使用了基于字母灰度模式、DCT 和频域遮掩模型的灰度级水印图象预处理技术。该方案提高了水印鲁棒性和嵌入容量。

在文献[17]中, Kang 等选择视频帧的重要信息, 例如边缘信息、运动矢量、编码模式等, 利用奇偶嵌入方案将它们嵌入到视频码流中, 可用于纠正、隐藏视频码流的传输错误。Golikeri 等<sup>[18]</sup>为 H. 264 设计了基于扩展变换标量 Costa 方案(Spread Transform Scalar Costa Scheme, ST-SCS)的鲁棒水印, 水印信息被嵌入在宏块残差数据的变换域中, 提升了水印的鲁棒性和不可感知性。Wu 等<sup>[19]</sup>选择 I 帧的  $4 \times 4$  像素块, 在其量化后的 DCT 系数上通过抖动调制(Dither Modulation, DM)技术实现水印嵌入, 并利用粒子群优化算法优化水印嵌入位置, 改善了水印的鲁棒性和不可感知性。Nezhadarya 等<sup>[20]</sup>通过扩展变换抖动调制技术(Spread Transform Dither Modulation, ST-DM)将一组伪随机数嵌入到 I 帧的小波变换域中, 根据提取的信息与嵌入信息之间的相似性可测量视频质量。这几个方案都使用了量化水印调制技术。量化水印不似扩频水印将载体信号视为水印信道内的干扰信号, 具有完全剔除载体信号干扰的优点, 可在水印鲁棒性、不可感知性和水印容量之间获得良好的折衷效果。

水印鲁棒性与不可感知性是两个相互矛盾的属性, 解决该问题的有效途径是充分利用人眼的视觉特性, 在满足不可感知性的要求下, 合理分配水印信号的能量, 以尽可能提高局部嵌入水印分量的强度。Yen 等<sup>[21]</sup>提出一种结合人类视觉模型和扩频技术的视频水印。他们选择 I 帧的  $4 \times 4$  像素块, 在其 DCT 域中嵌入水印, 可成功抵抗共谋攻击。Golikeri 等<sup>[18]</sup>利用了人类感知模型和鲁棒性 - 失真度(Robustness - Distortion)准则确定 ST-SCS 水印的量化步长。Chen 等<sup>[22]</sup>设计了一种基于奇异值分解的视频水印, 但是, 为了抵抗噪声和滤波攻击, 对高能量的块和低能量的块, 水印嵌入时使用了不同的奇异值选择方案。Su 等<sup>[23]</sup>在预测残差的 DCT 域中采用人类视觉模型和扩频技术嵌入视频片的编号信息, 并给出了基于镜头突变检测的水印信号同步方案。该方案可检测视频帧增删和抵抗转码操作。这些算法都在一定程度上改善了水印的鲁棒性。

现有的压缩域视频水印方案将嵌入位置更多选择在 I 帧中, 这主要是考虑到 H. 26X 编码对 I 帧信号的压缩比 P 帧和 B 帧少, 特别是 I 帧中  $4 \times 4$  宏块具有更丰富的纹理信息, 对其修改引起的视觉质量失真较小。Mansouri 等<sup>[24]</sup>选择 I 帧中两个  $4 \times 4$

像素块, 对每个块计算非零量化值的 DCT 系数的个数, 利用二者之差的符号嵌入水印信息。由于利用了时空分析法和优先权矩阵, 该方案改善了水印性能。Yang 等<sup>[25]</sup>给出了一种面向 H. 264 视频流的信息隐藏技术。该方案选择 I 帧的  $4 \times 4$  像素块, 利用矩阵编码将水印信息嵌入到帧内预测模式中。该方案复杂度低, 可实现实时检测和盲检测。Ma 等<sup>[26]</sup>利用 I 帧的  $4 \times 4$  像素块, 在其 DCT 域中选择多对 DCT 系数嵌入水印。该方案减少了失真漂移的作用, 但是降低了水印嵌入容量。进一步, 文献[27]提出对隐藏信息应用伴随式编码(syndrome code), 提升了方案<sup>[26]</sup>的鲁棒性。Ma 等<sup>[28]</sup>选择一组非零系数来插入水印, 对于帧内预测模式变化稳健的 I4 宏块进行嵌入, 该方案避免比特率的增加, 增强了水印方案的安全性并且鲁棒性好。然而, 在 H. 26X 编码的 P 帧中嵌入水印, 可以提升水印容量, 这是因为 P 帧出现的频率比 I 帧高<sup>[14]</sup>。He 等<sup>[12]</sup>提出一种面向 H. 264 视频流的双水印技术。他们在 I 帧中  $4 \times 4$  像素块的 DCT 域内选择幅值最大的一个系数, 根据要嵌入的版权信息将其调制为奇数或偶数, 又选择每个视频图像组(Group of Pictures, GOP)中第一个 P 帧的  $4 \times 4$  像素块, 利用矩阵编码技术嵌入用户信息。该方案可改善水印的不可感知性和安全性, 适用于视频点播服务。

在 I 帧中嵌入水印存在失真漂移的问题, 如图 9 所示, 我们假设当前预测块是  $B_{ij}$ 。在帧内预测中,  $B_{ij}$  块中的每个像素是由预测值和残差值相加得到的。由于预测值是由图 9 中虚线围成的小正方形的像素计算的, 因此嵌入引起的  $B_{i-1,j-1}$ ,  $B_{ij-1}$ ,  $B_{i-1,j}$  和  $B_{i-1,j+1}$  块的偏差将传播到  $B_{ij}$ 。即嵌入引起的块的失真将通过帧内预测传播到其他块, 从左到右下累积的这种视觉失真被定义为失真漂移。

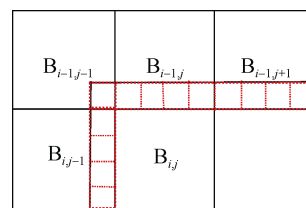
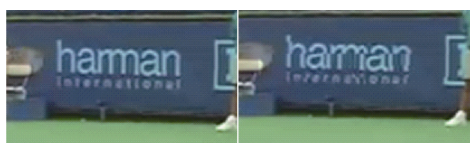


图 9 帧内预测块  $B_{ij}$  和其相邻的编码块

Figure 9 Intra prediction block  $B_{ij}$  and its adjacent coding block

失真漂移现象会对视频质量造成严重的影响, 视频视觉效果也会有明显的失真, 文献[29]和文献[30]中给出了失真漂移现象对视频质量影响的图例, 分别如图 10(a)和图 10(b)所示。可以使用漂移补偿技

术来避免失真漂移的影响。目前仅少数方案利用帧内预测模式嵌入水印时考虑了失真漂移效应, Gong 等<sup>[31]</sup>提出将水印嵌入到亮度残差块的量化直流(DC) DCT 系数中, 在嵌入之前通过帧内误差漂移补偿信号添加水印。然而, 该方案无法提取出确切的嵌入内容。文献[32]中利用了  $4 \times 4$  DCT 块的几个成对系数来嵌入数据并补偿因嵌入引起的失真。文献[26]中提出的算法采用  $4 \times 4$  DCT 块的若干成对系数来累积嵌入引起的失真, 并使用帧内预测的方向来避免失真漂移。Liu 等<sup>[27]</sup>在数据隐藏之前使用 BCH (n, k, t) syndrome code 对嵌入数据进行编码来提高鲁棒性, 然后在满足该方案中提出避免失真漂移编码条件时, 将数据嵌入到 I 帧中的  $4 \times 4$  亮度 DCT 块的系数中。该方案具有更强的鲁棒性, 有效避免了失真漂移, 获得了较高的视觉质量。



(a) 文献[29](左原始帧, 右失真漂移帧)



(b) 文献[30](左原始帧, 右失真漂移帧)

图 10 失真漂移现象对视频质量影响

Figure 10 effect of distortion drift on video quality

### 3.3 面向 H. 264 编码标准的压缩域视频脆弱水印

在大多数文章研究鲁棒水印的同时, 部分研究者也开始对视频压缩域脆弱水印进行研究, 主要目的是解决视频码流的完整性检测、视频内容篡改的检测和定位等问题。脆弱水印方案一般包含两部分操作: 1) 认证码的生成方法; 2) 水印信息嵌入方法。Iqbal 等<sup>[33]</sup>计算视频流数据的 Hash 值作为认证码, 嵌入认证码时利用 MPEG-21 gBSD 确定嵌入位置。文献[34]也采用视频流数据的 Hash 值作为认证码, 但是将其嵌入在  $4 \times 4$  像素块的 DCT 域中。王等<sup>[35]</sup>

提出使用 I 帧中  $4 \times 4$  像素块的预测模式生成认证码, 并将认证码通过指数哥伦布码字映射技术嵌入到视频码流中。该方案计算量小, 可达到实时处理要求, 但是对视频质量有影响。Zhu 等<sup>[36]</sup>给出一种认证技术与编码过程相融合的方案, 它利用条带数据产生认证码, 然后将其嵌入在视频码流中, 并应用了最优化视频传输质量的策略, 在视频质量及认证方面都获得了改进的性能。这几种方案可以用于实现视频码流的完整性检测。

Fallahpour 等<sup>[37]</sup>利用宏块和数据帧的索引信息生成认证码, 并通过修改非零量化值的 DCT 系数将其嵌入。该方案也适用于 H. 265 标准, 它可以检测在时间域、空间域或者时空域对视频的修改。王等<sup>[38]</sup>基于 I 帧中块组之间能量不变的特点构建基于内容的认证码, 通过修改幅值较小的 DCT 系数和 P 帧的低频 AC 系数的符号实现认证码的嵌入。该方案可用于篡改检测, 并能保持视频的码率基本不变。林等<sup>[39]</sup>根据视频压缩域内 I 宏块的预测方式、块编码模式 (Coded Block Pattern, CBP) 提取可用于生成特征码的宏块, 并利用其子块上低频 DCT 系数的能量关系构建宏块级的内容认证码, 然后将其嵌入到 CAVLC 码字的拖尾系数中, 可实现对宏块级视频内容篡改的检测和定位。这几种方案属于半脆弱水印。

### 3.4 面向 H. 264 编码标准的压缩域视频多用途水印

由于部分应用环境要求水印不只具有一项功能, 多用途的压缩域视频水印也是本领域内的一个重要研究方向。多用途水印通过在载体信号中同时嵌入多个水印, 实现多种用途, 例如版权保护和内容认证, 因此, 解决水印信号的相互干扰是关键问题。H.26X 编码采用分层编码结构和多种编码技术, 为设计多用途的压缩域视频水印创造了有利条件。Qiu 等<sup>[40]</sup>选择使用帧内预测编码模式的  $4 \times 4$  像素块, 在其 DCT 域中提取对角线上的系数嵌入鲁棒水印, 另一方面, 按 MV 的位置定义两个集合, 利用这两个集合对 MV 进行修改使得 MVD 的值为奇数或偶数, 二者可表示 1 位脆弱水印信息。此方案中鲁棒水印可抵抗转码过程, 但是对其他信号处理操作的鲁棒性还有待提升。曹等<sup>[37]</sup>的思想与文献[41]相似, 区别在于他们使用一种 DCT 交流系数替换规则来修改 I 帧的  $4 \times 4$  亮度块, 并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。Lian 等<sup>[42]</sup>提出对运动矢量预测误差和 DCT 系数的符号进行加密, 同时对 DCT 系数的幅值加水印。这两个算法互不影响且形

成互补,可作为实现多媒体安全传输与受控分布的一种选择。Liu等<sup>[43]</sup>提出一种基于修改帧内预测模式的视频数据隐藏方法和选择性加密方法相结合的框架,它通过调整帧内预测模式来隐藏数据比特,该框架不仅提供加密隐私保护的能力,还具有内容认证的能力,而且还可以提供错误隐藏等能力。

另外,通过在载体信号中嵌入一个可恢复水印也可实现多种用途,例如原始载体信号重建和内容篡改检测。Wong等<sup>[44]</sup>通过缩放量化后的DCT系数的幅值实现信息隐藏,并利用反零游程长度编码提升信息隐藏容量。该方案可使视频图像的质量在水印嵌入前后保持一致,又可完全恢复原始视频数据。Chung等<sup>[45]</sup>在预测残差的DCT域内,通过修改量化后的DCT系数的直方图嵌入MV信息。该方案可用于检测和修复视频帧的传输错误。在文献[46]中,Xu等对视频流加密,并通过修改预测残差的DCT系数直方图嵌入水印信息。该方案可完整恢复原始视频数据,并且提升了水印安全性。Song等<sup>[47]</sup>给出一个基于MV的可恢复水印方案,它沿着给定的调制向量的方向修改幅值较大的MV,在保证视频质量的情况下可以实现恢复原始视频数据。

## 4 压缩域视频水印的应用前景

压缩域视频水印的研究和实际应用联系紧密,其研究成果广泛应用于数字视频的版权保护和所有权认定等方面,具体包括:

1) 版权保护:为声明对数字视频作品的所有权,所有者将水印嵌入原始视频载体中,提取水印的密钥掌握在所有者手里,然后就可以放心地公布视频,一旦发现有盗版出现,就可以以密钥提取水印证明版权归属,由此解决版权纠纷,达到版权保护的目。

2) 数字指纹:数字视频所有者在经过授权的拷贝中嵌入不同的水印,即数字指纹,所以一旦发现未经授权的拷贝,即可通过检测指纹追踪其来源。

3) 广播监视:广播电台在数字广播节目中嵌入标记其归属的水印信息,通过实时监测进行广播监视,防止其他广播电台的侵权行为。

4) 内容认证:现在市场上出现了很多可以修改视频内容的软件,这就使得视频内容与原始视频数据大相径庭,给用户的使用带来了很大的不便,此时就可应用视频水印进行内容认证,检测数字视频是否被修改或者哪部分被修改。

5) 拷贝控制:可以在数字视频中嵌入标识允许拷贝次数的数字水印,当用特殊的硬件来拷贝数字

视频时,每拷贝一次硬件就会将允许拷贝次数减一,以此达到拷贝控制的目的。

6) 信息保密:将需要秘密传送的信息嵌入到视频中,只有收发双方知道信息提取密钥,即使视频公布,不知情者也无法获取隐藏的信息,这样就达到了信息保密的效果。

一个典型视频压缩域水印的应用场景是影片发放。电视剧管理部门将一个新发行的电视剧发放给多个视频网站(或称资源代理商)时,要求该电视剧在视频网站上的播放进度必须与电视台同步,而且没有购买版权的视频网站不得播放。某些视频网站为了获取点击率,会违反规定提前播放电视台还没有播出的剧集,甚至将片源泄露给没有购买版权的视频网站。为了解决这些问题,可以利用压缩域视频水印技术在发放给不同视频网站的片源中嵌入不同的隐形水印(也称暗水印或不可感知水印),从而将责任溯源到每个视频网站。当出现侵权问题时,通过水印信息提取可以确定哪个视频网站提前发布片源或者泄露片源拷贝,同时也可以用于主动监视各个视频网站是否违规。图11给出了利用视频水印技术实现影片发放和责任追查过程。

除此之外,压缩域视频水印也可用于视频点播、视频搜索、视频传输错误恢复等,应用前景非常广阔。

## 5 存在的问题和未来研究的重点

目前与H.264编码标准相关的压缩域视频水印的研究相对较少,而针对新发布的H.265编码标准的水印研究才刚刚起步,该领域发展还很不完善,存在的问题主要包括如下几方面。

1) 很多方案选择I帧嵌入水印,主要考虑了嵌入位置对水印性能的影响,但是,水印嵌入多数还是采用传统的扩频技术或者基本的量化调制技术,缺少改进水印嵌入技术方面的研究。

2) 当水印嵌入发生在整数型信号变换和量化编码之间时,没有考虑如何消除量化编码的影响,实现联合量化编码的水印优化设计。

3) 少数方案利用帧内预测模式的像素块嵌入水印,并考虑了失真漂移效应,但是所提出的抑制失真漂移的条件比较苛刻,不适应一般的水印设计,而且缺少将水印嵌入与抑制失真漂移相结合的研究。

4) 已提出的运动矢量水印的鲁棒性一般较差,运动矢量的选择方案不够合理,运动矢量水印的设计比较直观、简易,缺少一定的数据或理论支撑,运动矢量搜索过程对水印性能的影响也没有得到充分的重视。

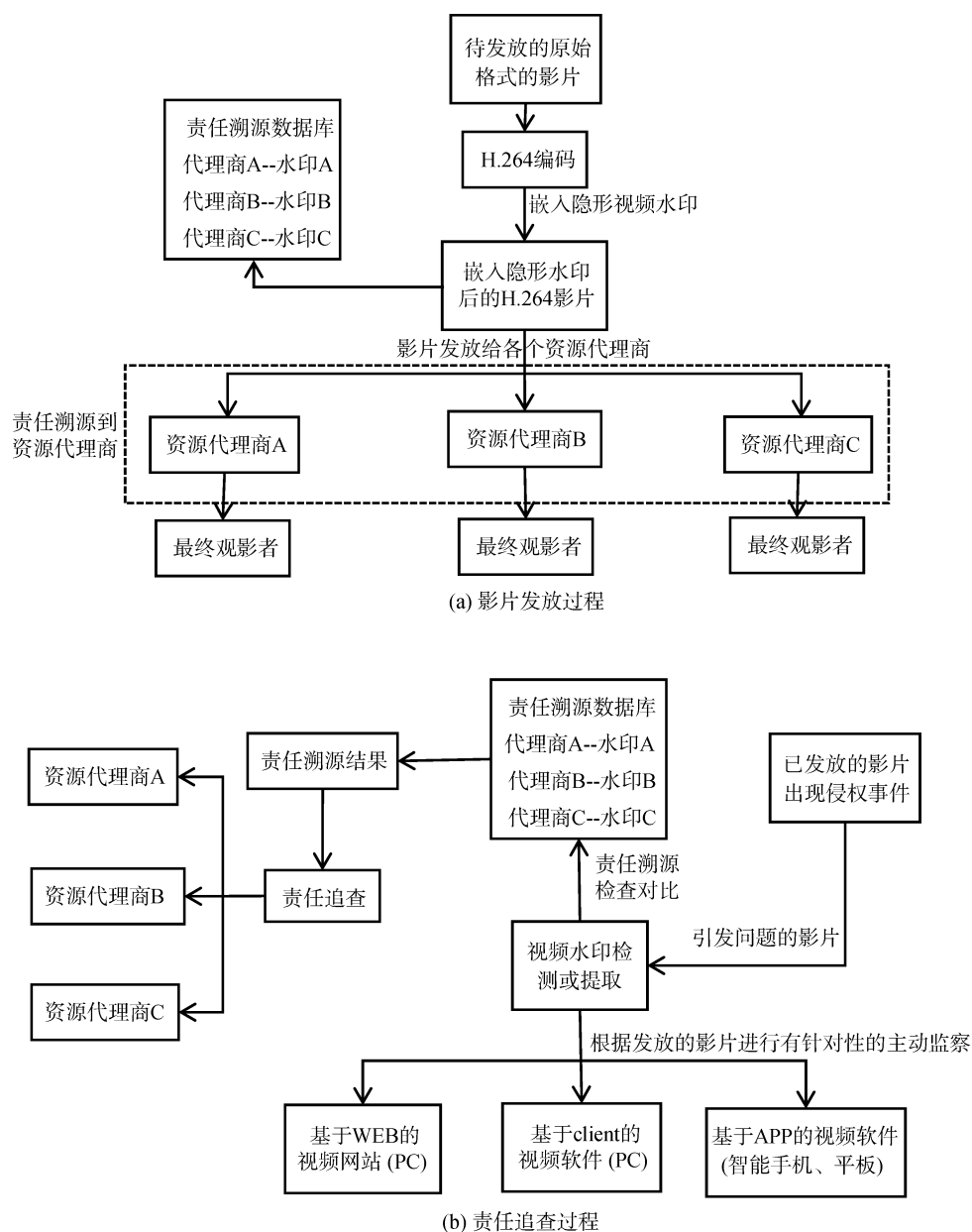


图 11 利用视频水印技术实现影片发放和责任追查过程

Figure 11 Using video watermarking technology to achieve film distribution and responsibility tracking

根据压缩域视频水印的研究现状以及存在的问题, 可以分析得出该领域未来研究的重点应包括以下几方面:

1) 发展面向 H. 264 与新一代视频压缩标准的压缩域视频水印方案, 为视频追踪、视频版权保护、视频安全传输、视频点播、视频搜索等应用奠定技术基础。

2) 结合视频压缩技术特征, 例如变换、量化、预测等, 提出适合视频压缩域的水印设计理论, 形成一套可优化水印性能的理论成果, 为改善水印性能奠定理论基础。

3) 解决视频编码标准给压缩域视频水印设计带来的问题, 特别是研究整数变换、量化、帧内预测与运动估计导致的一些问题的解决方案。

## 参考文献

- [1] H. J. Bi and J. Wang, "New Generation Video Compression coding Standard-H.264 / AVC," Beijing: people's Post and Telecommunications Press, 2009.  
(毕厚杰, 王健, 新一代视频压缩编码标准—H.264/AVC, 北京: 人民邮电出版社, 2009.)
- [2] J. Chen, J. Liu and X. X.Cao, "in-depth understanding of video coding and decoding technology-based on H.264 standard and ref-



- erence model," Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2012.
- (陈靖, 刘京, 曹喜信, 深入理解视频编解码技术—基于 H.264 标准及参考模型, 北京: 北京航空航天大学出版社, 2012.)
- [3] F. Hartung and B. Girod, "Watermarking of uncompressed and compressed video," *Signal Processing*, vol. 66, no. 11, pp. 283-301, 1998.
  - [4] M. D. Swason, B. Zhu and A. H. Tewfik, "Multiresolution scene-based video watermarking using perceptual models," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 16, no. 4, pp. 540-550, 1998.
  - [5] S. H. Sun, Z. M. Lu, X. M. Niu et al. "Digital watermarking Technology and Application," Beijing: Science Press, 2004.
  - (孙圣和, 陆哲明, 牛夏牧等, 数字水印技术及应用, 北京: 科学出版社, 2004.)
  - [6] Y. Tew and K. Wong, "An Overview of Information Hiding in H.264/AVC Compressed Video," *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 24, no. 2, pp. 305-319, 2014.
  - [7] G. C. Langelaar and R. L. Lagendijk, "Optimal differential energy watermarking of DCT encoded images and video," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 10, no. 1, pp. 148-158, 2001.
  - [8] E. T. Lin and E. J. Delp, "Temporal synchronization in video watermarking," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 52, no. 10, pp. 3007-3022, 2004.
  - [9] R. O. Preda and N. D. Vizireanu, "Quantisation-based video watermarking in the wavelet domain with spatial and temporal redundancy," *International Journal of Electronics*, vol. 98, no. 3, pp. 393-405, 2011.
  - [10] A. M. Alattar, E. T. Lin and M. U. Celik, "Digital watermarking of low bit-rate advanced simple profile MPEG-4 compressed video," *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 13, no. 8, pp. 787-800, 2003.
  - [11] J. M. Thiesse, J. Jung and M. Antonini, "Rate distortion data hiding of motion vector competition information in Chroma and Luma samples for video compression," *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 21, no. 6, pp. 729-741, 2011.
  - [12] Y. L. He, G. Yang and N. Zhu, "A real-time dual watermarking algorithm of H.264/AVC video stream for Video-on-Demand service," *AEU: International Journal of Electronics and Communications*, vol. 66, no. 4, pp. 305-312, 2012.
  - [13] M. Noorkami and R. M. Mersereau, "A framework for robust watermarking of H.264-encoded video with controllable detection performance," *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, vol. 2, no. 1, pp. 14-23, 2007.
  - [14] M. Noorkami and R. M. Mersereau, "Digital video watermarking in P-frames with controlled video bit-rate increase," *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, vol. 3, no. 3, pp. 441-455, 2008.
  - [15] L. N. Chen, G. B. Yang and N. B. Zhu, "A Cauchy distribution-based ternary hypothesis testing for bipolar additive watermark detection in H.264/AVC video," *Imaging Science Journal*, vol. 61, no. 3, pp. 301-310, 2013.
  - [16] J. Zhang, A. T. S. Ho, G. Qiu and P. Marziliano, "Robust video watermarking of H.264/AVC," *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 54, no. 2, pp. 205-209, 2007.
  - [17] L. W. Kang and J. J. Leou, "An error resilient coding scheme for H.264/AVC video transmission based on data embedding," *Journal of Visual Communication and Image Representation*, vol. 16, no. 1, pp. 93-114, 2005.
  - [18] A. Golikeri, P. Nasiopoulos and Z. J. Wang, "Robust digital video watermarking scheme for H.264 advanced video coding standard," *Journal of Electronic Imaging*, vol. 16, no. 4, pp. 1-14, 2007.
  - [19] C. H. Wu, Y. Zheng, W. H. Ip, C. Y. Chan, K. L. Yung and Z. M. Lu, "A flexible H.264/AVC compressed video watermarking scheme using particle swarm optimization based dither modulation," *AEU: International Journal of Electronics and Communications*, vol. 65, no. 1, pp. 27-36, 2011.
  - [20] E. Nezhadarya and R. K. Ward, "Semi-blind quality estimation of compressed videos using digital watermarking," *Digital Signal Processing*, vol. 23, no. 5, pp. 1483-1495, 2013.
  - [21] S. H. Yen, M. C. Chang and C. J. Wang, "A Robust Video Watermarking Scheme of H.264," *Joint Conference on Pervasive Computing(JCPC)*, pp. 155-160, Dec. 2009.
  - [22] W. M. Chen, C. J. Lai, H. C. Wang, H. C. Chao and C. H. Lo, "H.264 video watermarking with secret image sharing," *IET Image Processing*, vol. 5, no. 4, pp. 349-355, 2011.
  - [23] P. C. Su, C. S. Wu, I. F. Chen, C. Y. Wu and Y. C. Wu, "A practical design of digital video watermarking in H.264/AVC for content authentication," *Signal Processing: Image Communication*, vol. 26, nos. 8-9, pp. 413-426, 2011.
  - [24] A. Mansouri, A. M. Aznaveh, F. Torkamani-Azar and F. Kurugollu, "A low complexity video watermarking in H.264 compressed domain," *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, vol. 5, no. 4, pp. 649-657, 2010.
  - [25] G. B. Yang, J. J. Li, Y. L. He and Z. W. Kang, "An information hiding algorithm based on intra-prediction modes and matrix coding for H.264/AVC video stream," *AEU: International Journal of Electronics and Communications*, vol. 65, no. 4, pp. 331-337, 2011.
  - [26] X. J. Ma, Z. T. Li, H. Tu and B. C. Zhang, "A data hiding algorithm for H.264/AVC video streams without intra-Frame distortion drift," *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 20, no. 10, pp. 1320-1330, 2010.
  - [27] Y. X. Liu, Z. T. Li, X. J. Ma and J. Liu, "A robust data hiding algorithm for H.264/AVC video streams," *Journal of Systems and Software*, vol. 86, no. 8, pp. 2174-2183, 2013.
  - [28] Z. F. Ma, J. Q. Huang, M. Jiang, et al., "A Video Watermarking DRM Method Based on H.264 Compressed Domain with Low Bit-Rate Increase," *Chinese Journal of Electronics*, vol. 25, no. 04, pp. 641-647, 2016.
  - [29] X. H. Jiang, T. F. Sun, Y. Zhou, W. Wang and Y. Q. Shi, "A Robust H.264/AVC Video Watermarking Scheme with Drift Compensation," *Scientific World Journal*, vol. 2014, pp. 1-13, 2014.
  - [30] P. C. Su, C. W. Hsu and C. Y. Wu, "A practical design of content protection for H.264/AVC compressed videos by selective encryption and fingerprinting," *Multimed Tools Appl*, vol. 52, pp.

- 529-549, 2011.
- [31] X. Gong and H. M. Lu, "Towards fast and robust watermarking scheme for H.264 video," *ISM: 2008 IEEE International Symposium on Multimedia*, pp. 649-653, 2008.
- [32] X. J. Ma, Z. T. Li, L. Jun and W. D. Wang, "Data Hiding in H.264/AVC Streams with Limited Intra-Frame Distortion Drift," *Computer network and Multimedia Technology (CNMT'09)*, pp. 248, 2009.
- [33] R. Iqbal, S. Shirmohammadi and J. Y. Zhao, "Compressed domain authentication of live video," *IEEE International Conference on Signal Processing and Communications(ICSPC'07)*, vols 1-3, pp. 1443-1446, Dec. 2007.
- [34] S. Shahabuddin, R. Iqbal, S. Shirmohammadi and J. Y. Zhao, "Compressed-domain temporal adaptation-resilient watermarking for H.264 video authentication," *IEEE International Conference on Multimedia and Expo*, vols 1-3, pp. 1752-1755, New York, 2009.
- [35] D. R. Wang, H. L. Zhu and D. W. Xu, "fragile watermarking algorithm for H.264/AVC Video Stream Integrity Authentication," *Chinese Journal of Image Graphics*, vol. 16, no. 5, pp. 726-732, 2011.  
(王让定, 朱洪留, 徐达文, H.264/AVC 视频流完整性认证的脆弱水印算法, *中国图象图形学报*, 2011, 16(5): 726-732.)
- [36] X. Zhu and C. W. Chen, "A joint source-channel adaptive scheme for wireless h.264/avc video authentication," *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, vol. 11, no. 1, pp. 141-153, 2016.
- [37] M. Fallahpour, S. Shirmohammadi, M. Semsarzadeh and J. Y. Zhao, "Tampering detection in compressed digital video using watermarking," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 63, no. 5, pp. 1057-1072, 2014.
- [38] X. J. Wang, G. B. Yang and N. B. Zhu, "Content level Authentication of H.264/AVC Video Stream based on Semi-fragile watermarking," *Journal of Communications*, vol. 30, no. 11, pp. 71-78, 2009.  
(王小静, 杨高波, 朱宁波, 基于半脆弱水印的 H.264/AVC 视频流的内容级认证, *通信学报*, 2009, 30(11): 71-78.)
- [39] Z. G. Lin, K. F. Sun and X. H. Jiang, "Content-level Authentication Watermarking Algorithm for H.264/AVC Video Stream Based on VLC Domain," *Journal of Shanghai Jiaotong University*, vol. 45, no. 10, pp. 1531-1535, 2011.  
(林志高, 孙铁锋, 蒋兴浩, 基于 VLC 域的 H.264/AVC 视频流内容级认证水印算法, *上海交通大学学报*, 2011, 45(10): 1531-1535.)
- [40] G. Qiu, P. Marziliano, A. T. S. Ho and D. He, "A hybrid watermarking scheme for H.264/AVC video," *The 17th International Conference on Pattern Recognition(ICPR'04)*, vol. 4, pp. 865-868, 2004.
- [41] H. Cao, J. L. Zhou, S. S. Yu and S. G. Su, "Implementation of semi-fragile blind watermarking algorithm based on H.264 low bit rate video stream," *Journal of Electronics*, vol. 34, no. 1, pp. 40-44, 2006.  
(曹华, 周敬利, 余胜生, 苏曙光, 基于 H.264 低比特率视频流的半脆弱盲水印算法实现, *电子学报*, 2006, 34(1): 40-44.)
- [42] S. G. Lian, Z. X. Liu, Z. Ren and H. L. Wang, "Commutative encryption and watermarking in video compression," *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 17, no. 6, pp. 774-778, 2007.
- [43] S. H. Liu, S. Rho, W. Jifara and C. Liu, "A hybrid framework of data hiding and encryption in H.264/SVC," *Discrete Applied Mathematics*, pp. 48-57, 2018.
- [44] K. S. Wong, K. Tanaka, K. Takagi, and Y. Nakajima, "Complete video quality—preserving data hiding," *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 19, no. 10, pp. 1499-1512, Oct. 2009.
- [45] K. L. Chung, Y. H. Huang, P. C. Chang and H. Y. M. Liao, "Reversible data hiding-based approach for intra-frame error concealment in H.264/AVC," *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 20, no. 11, pp. 1643-1647, 2010.
- [46] D. W. Xu and R. D. Wang, "Efficient reversible data hiding in encrypted H.264/AVC videos," *Journal of Electronic Imaging*, vol. 23, no. 5, pp. 1-14, 2014.
- [47] G. Song, Z. Li, J. Zhao, J. Hu and H. Tu, "A reversible video steganography algorithm for MVC based on motion vector," *Multimedia Tools and Applications*, vol. 74, no. 11, pp. 3759-3782, 2015.



**朱新山** 博士, 现任天津大学自动化学院副教授。研究方向为机器学习、多媒体取证、多媒体信息隐藏。Email: xszhu126@126.com



**杨璐** 硕士研究生, 现在天津大学控制工程专业攻读硕士学位。研究方向为数字水印、信息安全。Email: yluoyang@tju.edu.cn