



计算机科学

COMPUTER SCIENCE

基于QDCT全局均分策略的鲁棒视频水印方案

陶新宇, 熊礼治, 张翔

引用本文

陶新宇, 熊礼治, 张翔. [基于QDCT全局均分策略的鲁棒视频水印方案](#)[J]. 计算机科学, 2023, 50(11): 168-176.

TAO Xinyu, XIONG Lizhi, ZHANG Xiang. [Robust Video Watermarking Scheme Based on QDCT Global Equalization Strategy](#) [J]. Computer Science, 2023, 50(11): 168-176.

相似文章推荐 (请使用火狐或 IE 浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

[融入全局信息的抽取式摘要研究](#)

Study on Extractive Summarization with Global Information

计算机科学, 2023, 50(4): 188-195. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.220200061>

[应用“大数据+区块链”优化立法评估制度的机理与路径](#)

Mechanism and Path of Optimizing Institution of Legislative Evaluation by Applying “Big Data+Blockchain”

计算机科学, 2021, 48(10): 324-333. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.201200105>

[基于微服务架构的ETC系统设计](#)

Design of ETC System Based on Microservice Architecture

计算机科学, 2020, 47(6A): 643-647. <https://doi.org/10.11896/JsJcx.190800010>

[一种基于2D和3D联合信息的改进MDP跟踪算法](#)

Improved MDP Tracking Method by Combining 2D and 3D Information

计算机科学, 2019, 46(3): 97-102. <https://doi.org/10.11896/j.issn.1002-137X.2019.03.013>

[基于能量差比率的DEW视频水印算法](#)

DEW Video Watermarking Algorithm Based on Energy Difference Ratio

计算机科学, 2010, 37(5): 271-273.

基于 QDCT 全局均分策略的鲁棒视频水印方案

陶新宇^{1,2} 熊礼治^{1,3} 张翔^{1,3}

1 数字取证教育部工程研究中心(南京信息工程大学) 南京 210044

2 南京信息工程大学软件学院 南京 210044

3 南京信息工程大学计算机学院、软件学院、网络空间安全学院 南京 210044

(xtao0110@163.com)

摘要 视频水印作为一种应用前景广阔的版权保护技术,近年来受到了广泛关注。与原始域方案不同,压缩域方案不需要完全编解码视频,具有更高的效率;并且视频存储和传输一般需要经过压缩编码才能进行,使得压缩域的鲁棒视频水印方案成为了研究热点。但现有的压缩域方案大多利用压缩域中的 QDCT 系数个体来嵌入水印,使得算法的鲁棒性不高。为了增加压缩域算法的鲁棒性,文中提出了一种基于 QDCT 全局均分策略的鲁棒视频水印方案。首先,利用非零系数个数选出视频中兼具纹理和高空间复杂度的块作为水印块,将两块水印块组成块对;然后,分别计算出块对中所有系数的总和,根据系数总和的大小以及水印信息,通过全局均分策略修改后序块内所有非零系数的幅值,来满足方案设置的块对系数和规则,以实现水印的嵌入。实验结果表明,在保证含水视频具有较高视觉质量的前提下,该方案抵抗重压缩攻击和噪声攻击的鲁棒性均优于现有压缩域的鲁棒视频水印方案,分别提高了 8%,9%。

关键词: 视频水印;鲁棒水印;H.264 编解码;重压缩攻击;均分策略

中图分类号 TP391

Robust Video Watermarking Scheme Based on QDCT Global Equalization Strategy

TAO Xinyu^{1,2}, XIONG Lizhi^{1,3} and ZHANG Xiang^{1,3}

1 Engineering Research Center of Digital Forensics Ministry of Education(Nanjing University of Information Science and Technology), Nanjing 210044, China

2 School of Software, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

3 School of Computer Science, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

Abstract As a promising technology of copyright protection, video watermarking has attracted more and more attention in recent years. Different from the original domain scheme, the compressed domain scheme does not need to fully encode and decode video, so it has higher efficiency, and the video storage and transmission generally need to be compressed and encoded. Therefore, robust video watermarking scheme in compressed domain become a research hotspot. However, most of the existing schemes in the compressed domain use the individual QDCT coefficients in the compressed domain to embed the watermark, which makes the algorithm less robust. In order to improve the robustness of the compressed domain algorithm, a robust video watermarking scheme based on the QDCT global equalization strategy is proposed in this paper. Firstly, the blocks with both texture and high spatial complexity are selected as watermark blocks by using the number of non-zero coefficients, and then the sum of all coefficients in the two blocks is calculated respectively. According to the sum of the coefficients and the watermark information, all the non-zero coefficients in the sequence block are modified by the global equalization strategy to satisfy the block-pair coefficients rule, and the watermark is embedded. Experimental results show that the robust performance of the proposed scheme is better than that of the existing robust video watermarking scheme in resisting both recompression and noise attacks, increases by 8% and 9% respectively, while ensuring the high visual quality of the watermark-containing video.

Keywords Video watermarking, Robust watermarking, H.264 codec, Recompression attack, Equalizing strategy

到稿日期:2022-10-26 返修日期:2023-02-25

基金项目:国家自然科学基金(62172233);国家重点研发计划(2021YFB00900)

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China(62172233) and National Key R&D Program of China(2021YFB00900).

通信作者:熊礼治(lzxiong16@163.com)

1 引言

如今,各类短视频应用和直播平台的兴起,使得人们的交流方式愈加丰富。其中数字视频作为集成图像和音频的一种多媒体格式,包含了大量信息。然而,由于侵权者可以快速下载、复制以及非法传播视频,使得数字视频面临严峻的侵权挑战。作为验证数字内容版权的有效技术之一^[1-7],视频水印成为了一个重要的研究课题。视频水印的基本思想是在视频中嵌入水印信息,并为视频内容提供版权或完整性认证的证据。在实际应用中,视频在传输过程中容易遭到压缩、噪声等攻击,因此视频水印算法的鲁棒性至关重要。根据水印算法是否结合编解码技术,可将鲁棒视频水印算法分为原始域视频水印和压缩域视频水印。

原始域视频水印算法可以分为两类:空域和变换域。空域方法是基于视频像素域的,通过直接修改视频帧的像素值来嵌入水印,操作简单且复杂度低,但是缺乏鲁棒性,水印信息很容易被破坏;而变换域方法则是先对视频进行频域变换,再将水印嵌入到变换系数中,利用变换域的特性来提高水印算法的鲁棒性。

然而,视频信号通常以压缩格式进行存储和传输,因此原始域方案需要将视频完全解码,才能进行水印嵌入,导致算法效率较低,不满足实时性要求高的应用场景。为了保证水印算法的实用性,压缩域视频水印方案被提出。压缩域视频水印方案是一种在视频编码过程中嵌入水印的技术,而 H. 264 是当前最常用的视频编解码标准之一,因此大量基于 H. 264 的视频水印算法被提出。通常,基于 H. 264 的视频水印算法的嵌入载体包括:预测模式、运动矢量、熵编码的码字和 DCT (Discrete Cosine Transform) 域的 QDCT (Quantified Discrete Cosine Transform) 系数等。将信息嵌入在这些数据域中,可以避免繁琐的解压缩步骤导致的嵌入信息丢失,提高了算法性能。然而,基于预测模式、运动矢量和码字的水印方案遭受重压缩攻击后易被修改,导致水印信息大量丢失,鲁棒性较差,因此基于 H. 264 的鲁棒视频水印研究集中于 QDCT 系数。但目前基于 QDCT 系数的方法仍然存在鲁棒性不高的问题。

为了提高基于 QDCT 系数的视频水印方法的鲁棒性,本文提出了一种基于 QDCT 全局均分策略的鲁棒视频水印方案。首先,为了提高算法的鲁棒性和不可见性,选择含非零系数个数较多的 4×4 块作为水印嵌入的候选块,将两块候选块组成块对。然后,计算候选块对内所有系数的和,并将其作为一种新的嵌入载体,结合水印比特信息,利用全局均分策略修改后序块内所有非零系数的幅值,使两个块内非零系数的总和满足设置的规则,完成水印的嵌入。本文的主要贡献点归纳如下:

1) 提出了一种基于 QDCT 全局均分策略的鲁棒视频水印方法。利用一对 QDCT 块系数总和的关系规则来嵌入水印信息,避免含水印视频遭受攻击后水印信息的大量丢失,同时将修改幅度均匀分布到每个非零系数上,降低了水印嵌入对视频视觉质量造成的影响。

2) 实现了位置映射图的记录方法。根据 H. 264 编码

过程中 QDCT 块的存储机制,记录水印块的绝对位置,解决了水印在提取过程中不同步的问题。

3) 基于 QDCT 全局均分策略的鲁棒视频水印方法,不仅提高了抵抗重压缩和噪声攻击的鲁棒性,同时还提高了载体的视觉质量。

2 研究现状

根据是否结合视频编解码技术,视频水印方案可以分为两类:基于原始域和基于压缩域。

2.1 基于原始域的视频水印

基于原始域的视频水印方法将视频看作视频帧序列,不考虑视频的编码格式。根据嵌入域的不同,基于原始域的水印方法又可以进一步分为基于空域的算法和基于变换域的算法。

空域视频水印方案指基于视频帧的空域像素来嵌入水印,这类方法可以分为基于块、基于特征点和基于 LSBs (Least Significant Bits) 等。Celik 等^[8]提出了直接修改像素的 LSBs 来嵌入水印的方案,而 Tsai 等^[9]则提出了一种通过修改载体的不变特征区域来完成嵌入工作的方案。这类方案复杂度低且计算效率高,但是抵抗噪声干扰和旋转缩放等攻击的能力弱,且应用场景单一。

而变换域视频水印方案弥补了其不足,提高了算法抵抗攻击的鲁棒性,因此更适用于版权保护的应用场景。变换域方案即将空域视频内容转换为频域,通过修改频域系数来嵌入水印。Wang 等^[10]提出将水印嵌入到 DCT 低频系数中,可以抵抗降分辨率攻击,但修改低频 DCT 系数会对视频的视觉质量产生较大的影响。一些方案^[5-6,11]则选择将水印嵌入到 DWT (Discrete Wavelet Transform) 域上,对旋转、剪切等几何攻击具有鲁棒性。还有基于 DT-CWT (Dual-Tree Complex Wavelet Transform) 域的方案,2021 年 Huan 等^[7]提出了一种基于 DT-CWT 的鲁棒视频水印方案,利用子带间的强相关性嵌入水印,实现了抵抗几何攻击和重压缩的强鲁棒性。

尽管上述空域水印方案和变换域水印方案各有优势,但它们还需要进一步提升才能被应用到实时场景中。而压缩域水印方案在视频编码过程中嵌入水印,可以节省大量的计算资源和时间成本,适用于实时视频水印应用场景。

2.2 基于压缩域的视频水印

H. 264 压缩域视频水印方案^[12-28]根据嵌入语法元素和区域的不同,通常分为 4 个部分:帧内预测的模式^[19-20]、帧内预测的运动矢量^[13-14,21-22]、DCT 域的 QDCT 块^[12,15-18,23-28]以及熵编码的码字部分^[14,24]。

1) 运动矢量。运动矢量是基于参考帧,通过视频编码帧间预测^[13]得到的。Li 等^[22]通过修改参考帧的索引 LSBs 来完成;Feng 等^[23]则通过修改运动矢量嵌入水印来完成;Sun 等^[14]利用运动高频区域鲁棒性更强的特性,基于运动矢量的预处理手段,提出了一种抵抗重压缩的鲁棒视频水印方案。但人们通常对运动区域较敏感,基于运动矢量的方案对视觉质量影响较大。同时,解码器中的水印块很可能由于运动矢量变化而丢失,增加了发生不同步这一情况的概率。

2) 预测模式。Zhang 等^[20]利用相邻 QDCT 块预测模式

的奇偶性与水印信息形成对应,在3个块的预测模式上嵌入两比特的信息位。而 Wang 等^[19]通过调整预测模式,将 I 帧中 4×4 亮度块(Luminance, LUMA)的预测模式映射成 0 或 1,然后利用校验子格编码嵌入信息。该算法将嵌入信息带来的失真影响控制到理论最小值,还降低了比特率的增长。但预测模式与 QDCT 系数紧密相关,修改后对视觉质量的影响较大;并且预测模式比较脆弱,在重压缩攻击后容易被改变,鲁棒性较弱。

3)熵编码的码字。Sun 等^[14]和 Xu 等^[27]都利用熵编码得到的码字与水印信息形成映射表,通过替换码字值嵌入水印,优点是对视频比特率几乎没有影响。但码字本身比较脆弱,一旦视频受到任何攻击,信息就很可能被更改,甚至可能会因为码字长度改变而直接丢失,发生同步错误。

4)DCT 域的 QDCT 块。QDCT 块作为视频编码过程中极重要的一部分,其中块内非零系数的个数、系数的符号以及系数值都可以作为压缩域视频水印方案的信息载体。

Mansouri 等^[15]提出了基于 QDCT 块中非零系数的个数(Number of Non-Zero, NNZ)的鲁棒水印方案,通过将 QDCT 块中非零系数置 0 或者将 0 变为非零系数来修改 NNZ 值,从而嵌入水印,但该方案会增大同步错误的概率。假设某块嵌入水印后其 NNZ 值被改变,那么实际根据该水印块预测出的块可能与其邻居块有更好的匹配。此外,直接将非零系数改为 0 的做法会显著降低质量,而直接将 0 改为非零系数会显著增加视频比特率。

Ho 等^[25]、Xu 等^[27]和 Zhang 等^[28]则通过修改交流(Alternating Current, AC)系数符号来嵌入水印,但这类方案对 AC 系数值的修改幅度过大,对含水印视频的视觉质量影响较大。目前修改变换系数符号的思路主要应用在视频加密算法中,如在 Xu 等^[27]提出的视频加密方案中,针对残差系数的加密就是利用翻转系数的符号实现的。

QDCT 系数可分为低频、中频和高频。高频系数的值通常很小,修改它们不会对视频视觉质量产生显著影响^[29],但如果视频受到重压缩攻击或滤波攻击,高频系数则很容易被重置为 0。因此,Zhang 等^[25]提出在 QDCT 块对角线位置的中频系数嵌入水印信息的方案,Dutta 等^[16]则选出运动频率低和具有复杂纹理特征的区域,利用低频 AC 系数对的差值嵌入水印信息,提高方案的鲁棒性。Li 等^[17]根据不同预测模式,将 QDCT 系数进行分类,自适应地修改非参考系数来嵌入水印,并结合扩频码和汉明码增强方案的鲁棒性。Gaj 等^[18]选择不参与帧内预测过程的 QDCT 系数作为水印载体,通过修改系数对来嵌入水印,降低误差漂移造成的失真,其鲁棒性主要来源于 patchwork 算法。Zhou 等^[26]采用一种多系数修改法,将水印嵌入到 I 帧 4×4 块的残差像素空域中,保证视频被攻击后,即使当前水印块尺寸发生了变化,依然可以从中提取出水印信息,提高了鲁棒性。

3 预备知识

本文提出的方案是基于 H. 264 压缩中的 QDCT 编码过程。因此,本文对 QDCT 编码过程、重压缩攻击的 QP 值以及 QDCT 中的 NNZ 值等进行说明。

3.1 QDCT 编码过程

在视频编码中,视频帧从空域变换到频域会产生一些相关性很小的变换系数,需要对这些系数进行压缩编码,该过程被称为变换编码,这部分操作与 JPEG 图像编码中的 DCT 编码过程^[30]类似。在变换编码过程中,对预测得到的残差像素进行变换和量化操作,降低频域上的相关性。对残差像素 $res(j, k)$ 的计算如式(1)所示,其中 (j, k) 表示像素的坐标, $curr(j, k)$ 表示当前块中 (j, k) 位置的像素值, $pred(j, k)$ 是利用当前块的相邻块作为参考进行预测编码得到的,得到残差信息 $res(j, k)$ 再进行 DCT 变换。需要注意的是, H. 264 编码中的 DCT 是整数变换,也就是说,得到的 DCT 系数是整数,这么做是为了提高编码器的效率,降低时间成本。具体如式(2)所示,其中 IDCT 即整数 DCT,本文不再多做描述。JPEG 压缩中的有损压缩部分就是对 DCT 系数进行量化,减小高频部分的系数。H. 264 中的有损压缩部分也是如此,通过量化 DCT 系数并结合熵编码技术,来有效减小信号的值空间,以实现更好的压缩效果。量化过程的计算式如式(3)所示。其中, $dct(j, k)$ 代表矩阵中位于 (j, k) 位置的系数值; $qdct(j, k)$ 对应输出的量化系数值; $round$ 代表四舍五入操作; Q_{step} 为量化器补偿步长,也称量化步长,由编码参数 QP 决定。由此可以看出, QP 值在视频编码过程中至关重要。

$$res(j, k) = curr(j, k) - pred(j, k) \quad (1)$$

$$dct(j, k) = IDCT(res(j, k)) \quad (2)$$

$$qdct(j, k) = round[dct(j, k) / Q_{step}] \quad (3)$$

3.2 重压缩攻击的 QP 值

式(3)中, $qdct(j, k)$ 为量化后的变换系数,即 QDCT 系数,其与输入的 QP 值紧密相关的。如图 1 所示,即使 QP 只有很小的改动,但对 Q_{step} 值的影响却很明显,这意味着 QDCT 系数也会有较大范围的变化, QP 值越大, Q_{step} 值就越大。图 2 给出了不同 QP 下的 QDCT 系数值,初始 QP 值为 16,其他 3 组数据是改变 QP 后得到的 QDCT 系数值。QDCT 块会随 QP 改变而变化,当 QP 不断增大时,块中系数值为零的个数也会增加。不仅是高频系数,甚至低、中频的系数也很可能由于 QP 增大而被量化为零,视频丢失的信息越多,对其视觉质量的影响就越大。

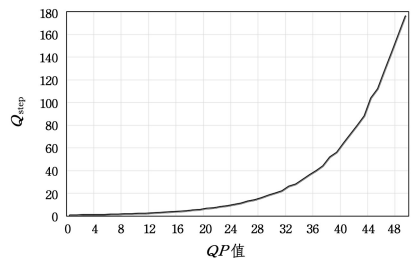


图 1 QP 与量化步长之间的关系

Fig. 1 Relationship between QP and Q_{step}

因此,重压缩攻击就是对含水印视频进行压缩编码,导致 QDCT 块的系数或 NNZ 发生改变。当重压缩的 QP 值与初始值接近时(例如从 16 变成 20), QDCT 系数的变化幅度较小;但当 QP 变化幅度较大时(例如从 16 变为 28),从图 2 可以看出,高频系数甚至包括部分中低频系数被量化为 0, NNZ

也从 13 变为了 10。因此,当 QP 变化幅度较大时,无论是选择 QDCT 系数个体还是将 NNZ 作为水印载体,鲁棒性都不稳定。但是,相比块系数个体的变化,系数总和的变化小得多。图 2 中,当 $QP=[16,20,24,28]$ 时,对应的 QDCT 块内系数总和为 $[16,12,9,7]$ 。换句话说,即使重压缩使用不同的 QP 参数,QDCT 块整体的变幅始终小于块中的系数个体,从而降低了攻击对水印信息的影响。因此,本文选择基于整体 QDCT 块来完成水印信息的嵌入。

42	-21	-9	1	27	2	-13	-6
17	-15	-13	8	0	11	-9	-9
-3	-2	-4	15	5	-2	-1	-2
0	1	0	0	9	0	0	0
$QP=16$				$QP=20$			
17	1	-8	-4	11	0	-5	-2
0	7	-4	-5	0	5	-3	-3
3	-1	-1	-2	2	0	-1	-1
6	0	0	0	4	0	0	0
$QP=24$				$QP=28$			

图 2 不同 QP 下的 QDCT 系数值

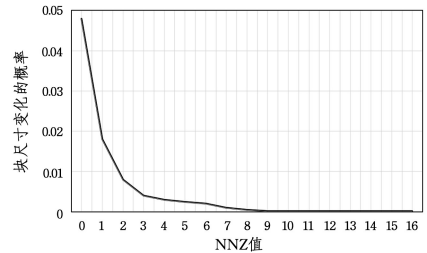
Fig.2 QDCT coefficients with different QP

3.3 QDCT 块的 NNZ 值

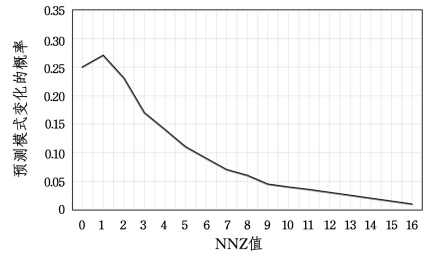
在重编码过程中,视频的某些宏块的预测模式以及块模式可能会被更改,导致解码时失去同步。为了评估不同宏块的受影响程度,需要寻找一个标准来进行衡量。通过实验可以发现,宏块内的非零系数越多,可以看作该块在空间维度上越复杂,块预测模式以及块模式发生变化的概率越小,即受影响程度越低。因此,QDCT 块的 NNZ 值可以作为衡量块自身鲁棒性的参考指标,因为 H.264 编码中 NNZ 是衡量不同块的空间复杂度的重要指标。

Mansouri 等^[15]提出,块的空间复杂度越高,抵抗帧内预测模式和块尺寸发生变化的鲁棒性就越强,并给出了实验结果,如图 3 所示。图 3(a)显示了 $QP=16$ 和 $QP=28$ 的重压缩攻击下 I 帧中 NNZ 值不同的块尺寸发生变化的概率,

图 3(b)显示的则是 NNZ 值不同的块预测模式发生变化的概率。从图 3 可以得出,块 NNZ 值越大,块尺寸和预测模式变化的概率就越小,代表块的空间复杂度越高,即块抵抗重压缩的鲁棒性越强,出现提取错误和同步错误的可能性就越小。因此,虽然修改 NNZ 值嵌入水印的方案存在缺点,但利用 NNZ 值来选出纹理复杂的块是可行的,可以提高算法的鲁棒性。



(a) 块类型从 4×4 变为 16×16 的概率



(b) 预测模式变化的概率

图 3 重压缩后对 NNZ 不同的 QDCT 块产生的影响

Fig.3 Effect of recompression on different NNZ QDCT blocks

4 基于 QDCT 全局均分策略的鲁棒视频水印方案

本文算法的框架如图 4 所示。图 4 给出了本文方案的 3 个阶段:预处理阶段、嵌入阶段以及提取阶段。预处理阶段对水印进行置乱,提高水印信息的安全性;嵌入阶段选出适合嵌入水印的候选块,完成水印嵌入;提取阶段的过程与嵌入阶段类似,找到水印块后提取出水印信息。

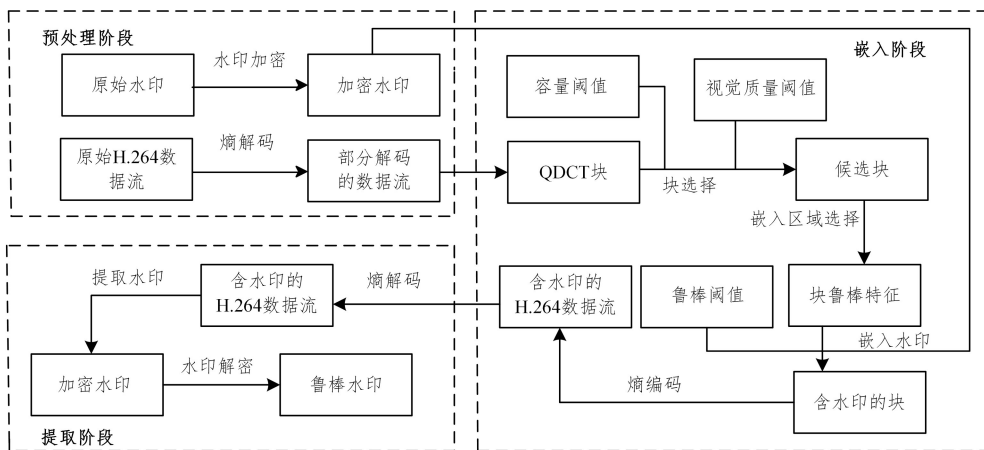


图 4 水印方案的整体框架图

Fig.4 Overall frame of watermark scheme

4.1 预处理

本文方案框架的第一步是预处理,预处理操作分两部分。第一部分将原始 H.264 视频流进行部分熵解码,第二部分对水印信息进行置乱。本文方案采用 Arnold 置乱,置乱和还原的方法分别如式(4)和式(5)所示。其中 (X_{on}, Y_{on}) 表示原始

坐标, (X_{new}, Y_{new}) 表示加密后的坐标,通过 M 次迭代最终得到加密后的坐标位置。 a 和 b 是两个可选的参数, mod 为求余数操作, N 是水印矩阵的尺寸。式(4)和式(5)中的 a, b, M 以及水印尺寸需要保存下来,将其作为解密密钥通过安全信道发送给解码端。

$$\begin{bmatrix} X_{\text{new}} \\ Y_{\text{new}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & b \\ a & ab+1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{\text{ori}} \\ Y_{\text{ori}} \end{bmatrix} \bmod (N) \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} X_{\text{ori}} \\ Y_{\text{ori}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ab+1 & -b \\ -a & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{\text{new}} \\ Y_{\text{new}} \end{bmatrix} \bmod (N) \quad (5)$$

4.2 嵌入阶段

整个嵌入阶段包括 3 个步骤:块选择、嵌入区域选择和水印嵌入。

4.2.1 块选择

相比平滑区域,纹理区域对水印嵌入具有更好的掩蔽效果。而视频帧的纹理区域通常以 4×4 大小进行编码,因此本文选择 I 帧中的 4×4 块嵌入水印。而由 3.3 节可知,块的 NNZ 值与鲁棒性成正比。但随着 NNZ 值的增大,符合条件的水印嵌入块数会减少,进而导致水印容量的降低。因此,本文方案设置了一个容量阈值 T_c ,以平衡水印的容量和鲁棒性。本文方案选择 I 帧中 NNZ 不小于 T_c 的块作为候选块。

4.2.2 嵌入区域选择

得到水印嵌入块后,需要进一步进行嵌入区域的选择。由 3.2 节可知,QDCT 块的整体特征比系数个体更稳定,因此本文提出以 QDCT 块内所有系数的总和为一种新的全局特征:SumofCoefficients。在本文中,它就是水印信息的载体,用 $sum_qdctCoeff$ 表示,对其具体的定义如式(6)所示。其中, i 表示当前 QDCT 块在视频帧中的位置, $qdct_i(j)$ 则表示第 i 个块中的第 j 个系数, $sum_qdctCoeff(i)$ 代表第 i 个块的系数总和。因此,为了提高方案的鲁棒性,通过修改 QDCT 块的 $sum_qdctCoeff$ 的策略来嵌入水印。

$$sum_qdctCoeff(i) = \sum_{j=1}^{16} qdct(j) \quad (6)$$

$$\begin{cases} sum_qdctCoeff_B' = sum_qdctCoeff_B - |Diff_{abs}| - T_r, & \text{if } bit=1 \text{ and } Diff_{abs} < 0 \\ sum_qdctCoeff_B' = sum_qdctCoeff_B + |Diff_{abs}| + T_r, & \text{if } bit=0 \text{ and } Diff_{abs} \geq 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} qdct'(j) = qdct(j) - round((|Diff_{abs}| + T_r)/N_B), & \text{if } bit=1 \text{ and } Diff_{abs} < 0 \\ qdct'(j) = qdct(j) + round((|Diff_{abs}| + T_r)/N_B), & \text{if } bit=0 \text{ and } Diff_{abs} \geq 0 \end{cases} \quad (9)$$

4.2.4 块位置记录

为了避免在提取水印的过程中发生不同步问题,需要记录嵌入水印块的位置信息,本文方案基于 I 帧编码过程中对 QDCT 宏块的分块处理特征来实现。如图 5 所示,每小格代表一个 4×4 块,从整体看是一个 16×16 的宏块,可以分成 4 个 8×8 的子宏块,即图 5 中的 A 区域;而一个 8×8 块又可以分成 4 个 4×4 块,即 B 区域。

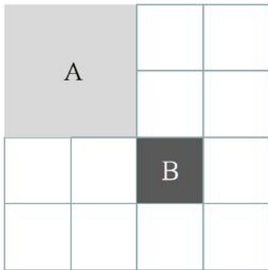


图 5 H.264 压缩域中的宏块结构图

Fig. 5 Macroblock structure in H.264 compression domain

在 H.264 编码过程中,一般用变量 $current_mb_nr$ 表示某宏块在当前帧中的位置,用变量 $b8$ 表示某子宏块在当前宏块中的位置,而 QDCT 块在子宏块中的位置则用变量 $b4$ 来

4.2.3 水印嵌入

为了提高鲁棒性,本文选两个块为一组来完成水印嵌入,并引入一个鲁棒阈值 T_r 。具体过程如下:

Step1 根据 4.2.1 节中的块选择过程,选出符合条件的块。当选出一对块时,跳转到 Step2。

Step2 假设这对 QDCT 块分别用 $Block_A$ 和 $Block_B$ 表示,分别计算出 $SumofCoefficients$ 并将其记作 $sum_qdctCoeff_A$ 和 $sum_qdctCoeff_B$,再根据式(7)计算两者的差值 $Diff_{abs}$ 。

$$Diff_{abs} = sum_qdctCoeff_A - sum_qdctCoeff_B \quad (7)$$

Step3 为了避免嵌入水印对视频视觉质量的影响过大,本文方案设置了视觉质量阈值 T_q 。如果 $Diff_{abs}$ 大于 T_q ,则表示块对之间的差距过大,跳转到 Step1 重新选择符合条件的块 $Block_B$,而 $Block_A$ 不变;否则继续 Step4。

Step4 记录 $Block_A$ 和 $Block_B$ 的位置,具体方式将在 4.2.4 节中进行详细描述。之后根据式(8)对块 $Block_B$ 的 $SumofCoefficients$ 进行修改,修改后用 $sum_qdctCoeff_B'$ 表示, bit 表示嵌入水印信息。

Step5 本文采用全局均分调制块内所有非零系数幅值的方式来更新 B 的 $SumofCoefficients$,如式(9)所示, $qdct(j)$ 和 $qdct'(j)$ 分别代表第 j 个 QDCT 系数修改前后的值, N_B 表示块 B 的 NNZ 值,为了保证兼容性,修改后的系数必须为整数,因此需要 $round$ 操作。值得注意的是,嵌入水印不能改变块的 NNZ 值,必须保证修改后系数值不为 0。因此,当满足式(9)第一个条件,时 $qdct'(j)$ 为 0,需要将其重置为 -1,若满足第二个条件则将其重置为 1。接着继续跳转到 Step1,直到嵌完所有水印。

表示,因此,根据式(10)可以计算出带水印的 QDCT 块在视频帧中的绝对位置 $location_{block}(i)$,其中 i 与已嵌入的水印比特数相对应。依次计算出所有水印块的绝对位置,最终得到位置映射图。位置映射图是在含水视频遇到不可逆的破坏后用于提取完整水印的重要信息。以分辨率为 352×288 的视频为例,嵌入 100 bit 水印后的位置映射图以二进制表示时大小为 125 Byte;利用目前最新的基于二进制位处理的无损压缩方法,单次压缩比最大可达到 50%;之后利用非对称密钥对其进行加密,最终通过可信通道将其发送到解码端。

$$location_{block(i)} = current_mb_nr * 16 + b8 * 4 + b4 \quad (10)$$

4.3 提取阶段

对含水视频进行解码后,接收者可以直接在无原始视频信息的情况下提取水印,提取阶段与嵌入阶段类似。接收者首先对含水视频解码,再找出符合容量阈值和视觉质量阈值条件的块对,并分别计算出 $sum_qdctCoeff_A$ 和 $sum_qdctCoeff_B$,之后根据式(11)提取出所有水印信息。但含水视频遭受严重攻击后出现了同步错误,这会导致提取时丢失部分水印信息,影响最终的水印验证。因此,当接收者发现提取的水印尺寸与原始水印尺寸不一致时,向发送端请求发送位置映射图。接收者根据位置映射图定位到水印块对,

重新计算各自的 $SumofCoefficients$ 值,最后根据式(11)提取出所有的水印信息 $extractbit$ 。

$$\begin{cases} extractbit=1, & \text{if } sum_qdctCoeff_A \geq sum_qdctCoeff_B \\ extractbit=0, & \text{if } sum_qdctCoeff_A < sum_qdctCoeff_B \end{cases} \quad (11)$$

5 实验结果

本章分为实验设置和实验性能两部分。其中,实验设置部分给出了实验环境和参数,并对方案的阈值进行了讨论;实验性能部分则对方案的嵌入容量、视觉质量以及鲁棒性进行了分析。

5.1 实验设置

本文采用 H.264 官方测试模型 JM 进行实现,并在 Matlab2018a 环境下测试了该算法的性能。实验选择了 CIF(352×288)和 QCIF(176×144)格式的视频测试序列,每种视频序列截取了 30 帧,帧率为 30 帧每秒,GOP 为 IPPPP。在每个 I 帧中嵌入水印,QP 值设为 28。同时为了保持调整方案的水印容量、不可感知性和鲁棒性之间的平衡,本文设置了 3 个阈值,即 T_r, T_q, T_c ,其中 T_c 值与候选块的 NNZ 值成正比。从 3.3 节可以得出,NNZ 值越大,视频水印方案抵抗重压缩攻击的鲁棒性就越强。但 T_c 过大会导致水印容量过小,无法满足实际应用的需求,因此应该根据不同应用场景对水印容量和鲁棒性的需求来选择 T_c 。由图 4 可知,当 T_c 值大于 8 时,QDCT 块尺寸发生变化的概率逐渐接近于 0,此时鲁棒性较强,因此,本文选择的 T_c 值均不小于 8,最终取值根据嵌入水印比特数来选择。

T_r 是为了提高方案鲁棒性设置的鲁棒阈值。由于 T_r 作用在整个块的 $SumofCoefficients$ 上,如果改变幅度过小则实验效果不明显,因此实验中 T_r 的取值跨度较大,本文将其设置为 5。本文方案采用比特正确率(Bits correct ratio,BCR)作为鲁棒性的衡量指标,其计算方式如式(12)所示。其中, $bits_{error}$ 代表错误的比特数, $bits_{total}$ 表示水印信息的总比特数。由表 1 所列的实验结果可知, T_r 与鲁棒性成正比,但与视觉质量成反比。当 T_r 等于 15 时,鲁棒性和视觉质量趋于平衡,均能达到一个较好的效果,因此本文方案中的鲁棒阈值 T_r 取值为 15。表 1 中加粗的数据表示最均衡或最优结果,后面同理。

$$BCR=1-bits_{error}/bits_{total} \quad (12)$$

表 1 不同 T_r 取值下重压缩攻击的鲁棒性和视觉质量

Table 1 Robustness and visual quality of recompression attacks

with different T_r			
视频序列	T_r	PSNR	BCR
Mobile	5	31.26	0.8678
	10	30.39	0.8743
	15	30.1	0.8971
	20	28.91	0.9129
Football	5	37.15	0.9043
	10	36.47	0.9143
	15	36.16	0.9229
	20	35.30	0.9371
Flower	5	37.06	0.8771
	10	37.01	0.8829
	15	36.12	0.8871
	20	33.20	0.8914

T_q 是视觉质量阈值,若 T_q 值较大,则表示块对的 $SumofCoefficients$ 值相差较大,鲁棒性更强,但含水印视频的视觉质量更差。表 2 列出了不同视频序列下 T_q 的不同取值对视觉质量和鲁棒性造成的影响,并在实验中增加不设置 T_q 的情形作为对照组,表 2 中用 ∞ 表示。从表 2 可以得出,设置 T_q 阈值得到的含水印视频的视觉质量得到明显提高。随着 T_q 值不断减小,含水印视频的视觉质量逐渐提高,但其鲁棒性有轻微的降低趋势。最终,对不同 T_q 取值下的视频视觉质量和鲁棒性的表现进行综合比较后,本文将 T_q 设置为 20。

表 2 不同 T_q 取值下重压缩攻击的鲁棒性和视觉质量

Table 2 Robustness and visual quality of recompression attacks

with different T_q			
视频序列	T_r	PSNR	BCR
Mobile	18	44.67	0.8657
	20	44.11	0.8914
	22	42.90	0.8929
	24	42.70	0.8957
	∞	30.39	0.8971
Football	18	42.15	0.8916
	20	41.72	0.8975
	22	41.41	0.8975
	24	40.31	0.9011
	∞	36.16	0.9229
Flower	18	42.05	0.8729
	20	41.92	0.8786
	22	41.91	0.8786
	24	39.86	0.8857
	∞	36.12	0.8871

实际上,以上阈值的选择并非固定的,可根据实际应用的需求灵活选取。

5.2 实验性能

5.2.1 嵌入容量

水印容量一般根据最终嵌入在载体中的有效负载数来衡量。本文方案的水印容量取决于嵌入阶段中设置的容量阈值以及视频序列本身的纹理复杂度。表 3 列出了各视频序列在不同容量阈值下的嵌入容量。当阈值相同时,Mobile,Tempete 和 Stefan 等视频序列的嵌入容量普遍较高。因为这些视频纹理复杂,平滑区域较少,高 NNZ 值的 QDCT 块更密集,容量也就更高。而对于同一个视频序列,设置的阈值越大,可嵌入的容量就越低。

表 3 不同 T_c 取值下重压缩攻击的鲁棒性和视觉质量

Table 3 Robustness and visual quality of recompression attacks

with different T_c					
视频序列	$T_c=4$	$T_c=6$	$T_c=8$	$T_c=10$	$T_c=12$
Bus	436	319	216	135	68
Container	201	153	106	65	24
Football	398	293	215	154	85
Mobile	559	479	376	246	109
Tempete	502	380	276	189	101
Stefan	410	365	296	213	119

5.2.2 视觉质量

本节将从含水印视频的主观表现和客观实验结果两个方面对其视觉质量进行分析评价。

主观表现如图 6 所示,初始 QP 值均设置为 28,嵌入容量为 100 bit,同时本文方案 T_q 取值 20, T_r 取值 15, T_c 取 8。由

图 6 可知,水印信息的嵌入没有导致视频产生明显的视觉伪影,人眼无法区分原始帧和水印帧。



图 6 含水印视频序列 (Football, Stefan, Mobile, Tempete) 的主观视觉表现

Fig. 6 Subjective visual representation of watermarked video (Football, Stefan, Mobile, Tempete)

本文方案选择峰值信噪比 (Peak Signal to Noise Ratio, PSNR) 作为客观实验的衡量标准,并与 Dutta 等^[16]以及 Gupta 等的方案^[31]进行了比较。实验选取相同的视频序列,其他条件与主观表现实验保持一致,实验结果如图 7 所示。结果表明,本文方案的 PSNR 在各个视频序列上均优于其他方案。这是因为本文方案只选择纹理复杂的 QDCT 块作为载体,并且水印嵌入阶段采用全局均分策略将修改量均分到每个非零系数上,对 QDCT 系数个体的改动幅度较小。

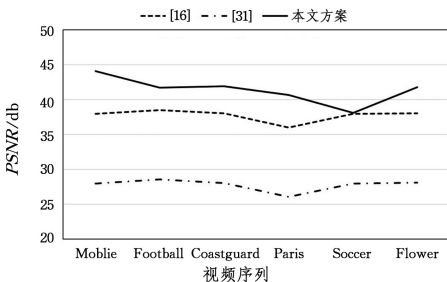
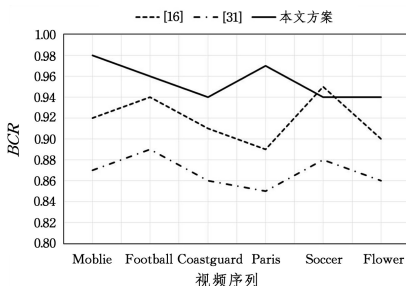


图 7 含水印视频序列的客观视觉质量

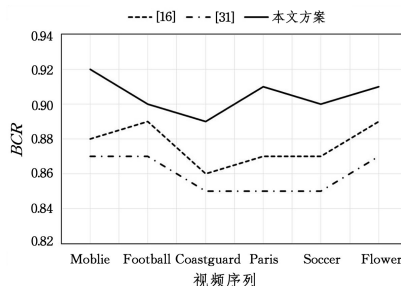
Fig. 7 Objective visual quality of watermark video

5.2.3 消融实验

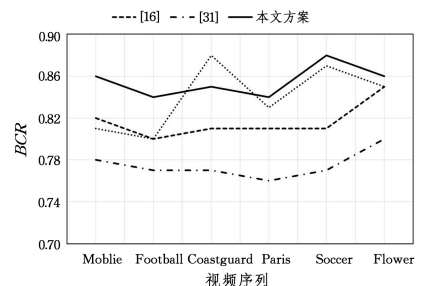
通过修改 QDCT 的 *SumofCoefficients* 和单个系数来嵌入水印信息,用 BCR 作为鲁棒性的衡量指标,实验结果如表 4 所列。其中, S1 表示修改 *SumofCoefficients* 来



(a) QP 值保持为 28



(b) QP 值为 26



(c) QP 值变为 30

图 8 抵抗不同 QP 取值的重压缩攻击的鲁棒性

Fig. 8 Robustness of recompression attacks with different QP

嵌入水印的方案, S2 表示修改单个系数来嵌入水印的方案。为了保证对比的公正性, S2 中选择 QDCT 块中鲁棒性较高的低频 AC 系数, 并且鲁棒阈值 T_r 都取 5。由表 4 可知, 在不同的 QP 取值和测试序列下, S1 方案抵抗重压缩攻击的鲁棒性均优于 S2 方案, 至少将 BCR 提高了 4%, 最多提高了 18%。同时也可以看出, 当 QP 值变化较大时, S2 方案的 BCR 有较大波动, 而 S1 方案的 BCR 波动较小, 并且始终能保持在 80% 以上, 这些都说明含水印视频遭受重压缩攻击后, 整个 QDCT 块的 *SumofCoefficients* 所受到的影响相比块中单个系数要小。因此, 利用 QDCT 的 *SumofCoefficients* 来嵌入水印, 提高了鲁棒性。

表 4 基于 *SumofCoefficients* 和基于单个系数的水印方案对鲁棒性的影响

Table 4 Influence of the watermark scheme based on *SumofCoefficients* and single coefficient on the robustness

QP 值	视频序列 BCR									
	Tempete		Mobile		Bus		Football		Stefan	
	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2
24	0.85	0.81	0.87	0.82	0.84	0.76	0.88	0.82	0.86	0.81
26	0.90	0.86	0.90	0.86	0.90	0.82	0.92	0.81	0.85	0.80
28	0.97	0.90	0.98	0.94	0.97	0.86	0.98	0.89	0.97	0.94
30	0.89	0.70	0.88	0.77	0.88	0.70	0.83	0.78	0.88	0.80
32	0.82	0.69	0.86	0.76	0.80	0.64	0.80	0.68	0.87	0.71

5.2.4 重压缩和噪声攻击下的鲁棒性对比

鲁棒性是衡量鲁棒视频水印方案性能最重要的一项指标。在本小节中, 将本文方案的鲁棒性与 Mansouri 等的方案^[15]、Dutta 等的方案^[16]、Gupta 等的方案^[31]以及 Ding 等的方案^[32]进行了比较。

为了证明本文方案在鲁棒性上的优越性, 本小节进行了重压缩攻击和噪声攻击的对比实验。图 8 给出了不同视频序列抵抗重压缩攻击的实验结果, 其中 6 组视频序列的初始 QP 值均为 28。该实验模拟了含水印视频遭受重压缩攻击的不同情形: 压缩 QP 不变、压缩 QP 减小 (变为 26)、压缩 QP 增大 (变为 30)。由于 Ding 等的方案^[32]中只给出了 QP 值增大实验, 并且 QP 增大对视频的影响更大, 更具实际意义, 因此将本文方案与 Ding 等的方案^[32]进行对比, 结果如图 8(c) 所示。另外, 本小节增加了一组 QP 值变幅更大 (QP 变为 28) 的重压缩攻击的对比实验, 其中 4 组视频序列的初始 QP 值均为 24, 实验结果如图 9 所示。从图 8 和图 9 可以得出, 本文方案在鲁棒性上基本优于其他方案。

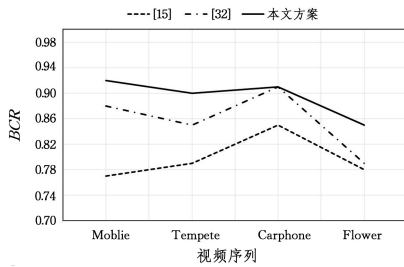


图9 抵抗QP值变为28的重压缩攻击的鲁棒性

Fig. 9 Robustness against recompression attacks when the QP value is 28

视频在传输过程中还可能被噪声攻击干扰,常见的噪声攻击有椒盐噪声和圆形均值滤波等。本小节进行了不同噪声攻击下各方案的鲁棒性对比实验,实验结果如表5所列,其中椒盐噪声的密度参数为0.001,圆形均值滤波的半径参数为0.05。由表5可知,本文方案在抵抗噪声攻击时,各个视频序列的鲁棒性均优于其他方案。

表5 针对不同视频序列的两种噪声攻击的鲁棒性

Table 5 Robustness of two noise attacks against different video sequences

攻击方式	参数	视频序列	文献[16]	文献[31]	本文方案
椒盐攻击	密度=0.001	Mobile	0.86	0.79	0.94
		Football	0.89	0.82	0.92
		Coastguard	0.83	0.76	0.90
		Paris	0.90	0.83	0.93
		Soccer	0.87	0.80	0.94
		Flower	0.90	0.83	0.92
圆形均值滤波	半径=0.05	Mobile	0.89	0.82	0.93
		Football	0.87	0.80	0.89
		Coastguard	0.85	0.78	0.88
		Paris	0.87	0.80	0.92
		Soccer	0.88	0.81	0.97
		Flower	0.80	0.73	0.87

综上所述,无论抵抗重压缩攻击还是噪声攻击,本文方案的鲁棒性都优于现有的压缩域视频水印方案。

结束语 本文提出了一种基于 QDCT 全局均分策略的鲁棒视频水印方案。根据 QDCT 块中非零系数的个数,结合设置的阈值选出鲁棒性和容量较平衡的块作为水印块,提出了一种全局均分策略的嵌入方法,基于块对中各自系数总和的大小嵌入不同的水印信息,提高视频载体抵抗重压缩攻击和噪声处理攻击的鲁棒性。同时,将嵌入过程中对块系数总和的修改操作均分到调整块内所有非零系数的幅值上,降低了水印嵌入对视频载体的视觉质量造成的影响。本文方案在直播或视频点播等网络环境复杂的实时应用场景下也能取得较好的鲁棒性,大大降低了水印信息丢失的风险,同时对视频载体的视觉质量的影响也较小。本文方案是依据 H. 264 编码标准设计的一种鲁棒水印算法,对于其他视频编码标准,需要做进一步的调整与改进。在此基础上,设计一种通用的鲁棒视频水印方法是今后的主要的工作。

参考文献

[1] ASIKUZZAMAN M, PICKERING M R. An overview of digital

video watermarking[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2017, 28(9): 2131-2153.

- [2] MAREEN H, COURTEAUX M, PRAETER J D, et al. Camcording-resistant forensic watermarking fallback system using secondary watermark signal[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2020, 31(9): 3403-3416.
- [3] XIANG Y, NATGUNANATHAN I, PENG D Z, et al. Spread spectrum audio watermarking using multiple orthogonal PN sequences and variable embedding strengths and polarities[J]. IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, 2017, 26(3): 529-539.
- [4] FANG H, ZHANG W M, MA Z H, et al. A camera shooting resilient watermarking scheme for underpainting documents[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2019, 30(11): 4075-4089.
- [5] PONNI A S S, RAMAKRISHNAN S. Fibonacci based key frame selection and scrambling for video watermarking in DWT-SVD domain [J]. Wireless Personal Communications, 2018, 102(2): 2011-2031.
- [6] SHOITAN R, MOUSSA M M, ELSHOURA S M. A robust video watermarking scheme based on Laplacian pyramid, SVD, and DWT with improved robustness towards geometric attacks via SURF [J]. Multimedia Tools and Applications, 2020, 79(35): 26837-26860.
- [7] HUAN W N, LI S, QIAN Z X, et al. Exploring stable coefficients on joint sub-bands for robust video watermarking in DT CWT domain[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2021, 32(4): 1955-1965.
- [8] CELIK M U, SHARMA G, TEKALP A M, et al. Lossless generalized-LSB data embedding[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2005, 14(2): 253-266.
- [9] TSAI J S, HUANG W B, KUO Y H. On the selection of optimal feature region set for robust digital image watermarking[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2010, 20(3): 735-743.
- [10] WANG Y L, PEARMAIN A. Blind MPEG-2 video watermarking robust against geometric attacks: a set of approaches in DCT domain[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(6): 1536-1543.
- [11] LIU Q L, YANG S G, LIU J, et al. A discrete wavelet transform and singular value decomposition-based digital video watermark method[J]. Applied Mathematical Modelling, 2020, 85: 273-293.
- [12] ASIKUZZAMAN M, ALAM M J, LAMBERT A J, et al. Robust DT CWT-based DIBR 3D video watermarking using chrominance embedding [J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2016, 18(9): 1733-1748.
- [13] TEW Y, WONG K S. An overview of information hiding in H. 264/AVC compressed video[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2013, 24(2): 305-319.
- [14] SUN J, JIANG X P, LIU J, et al. An anti-recompression video watermarking algorithm in bitstream domain [J]. Tsinghua Science and Technology, 2020, 26(2): 154-162.
- [15] MANSOURI A, AZNAVEH A M, TORKAMANI-AZAR F, et al. A low complexity video watermarking in H. 264 compressed domain[J]. IEEE Transactions on Information Forensics

- and Security, 2010, 5(4):649-657.
- [16] DUTTA T, GUPTA H P. An efficient framework for compressed domain watermarking in p frames of high-efficiency video coding (HEVC)-encoded video[J]. ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications, and Applications, 2017, 13(1):1-24.
- [17] LI Y, WANG H X. Robust H. 264/AVC video watermarking without intra distortion drift[J]. Multimedia Tools and Applications, 2019, 78(7):8535-8557.
- [18] GAJ S, KANETKAR A, SUR A, et al. Drift-compensated robust watermarking algorithm for H. 265/HEVC video stream[J]. ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications, and Applications, 2017, 13(1):1-24.
- [19] WANG Y, CAO Y, ZHAO X F, et al. A prediction mode-based information hiding approach for H. 264/AVC videos minimizing the impacts on rate-distortion optimization[C]//Proceedings of International Workshop on Digital Watermarking. Cham: Springer, 2017:163-176.
- [20] ZHANG Y N, ZHANG M Q, ZHANG Z, et al. Video steganographic algorithm based on intra prediction modification for H. 264/AVC[C]//First International Conference on Real Time Intelligent Systems. Cham: Springer, 2016:145-155.
- [21] DE P J, VAN d V J, VAN K N, et al. Moving object detection in the HEVC compressed domain for ultra-high-resolution interactive video[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Consumer Electronics. Las Vegas, IEEE, 2017:135-136.
- [22] LI J, LIU H M, HUANG J W, et al. Reference index-based H. 264 video watermarking scheme[J]. ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications, and Applications, 2012, 8(2S):1-22.
- [23] FENG G, WU G Z. Motion vector and mode selection based fragile video watermarking algorithm[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Anti-Counterfeiting, Security and Identification. Xiamen: IEEE, 2011:73-76.
- [24] CHEN Y L, WANG H X, WU H Z, et al. Adaptive video data hiding through cost assignment and STCs[J]. IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing, 2019, 18(3):1320-1335.
- [25] ZHANG J, HO A T S, QIU G, et al. Robust video watermarking of H. 264/AVC[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II Express Briefs, 2007, 54(2):205-209.
- [26] ZHOU Y M, WANG C Y, ZHOU X. An intra-drift-free robust watermarking algorithm in high efficiency video coding compressed domain[J]. IEEE Access, 2019, 7:132991-133007.
- [27] XU D W, WANG R D, WANG J C. A novel watermarking scheme for H. 264/AVC video authentication[J]. Signal Processing: Image Communication, 2011, 26(6):267-279.
- [28] ZHANG J, HO A T S. Efficient video authentication for H. 264/AVC[C]//Proceedings of First International Conference on Innovative Computing, Information and Control-Volume I. Beijing: IEEE, 2006, 3:46-49.
- [29] GHASEMPOUR M, GHANBARI M. A low complexity system for multiple data embedding into H. 264 coded video bit-stream [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2019, 30(11):4009-4019.
- [30] SUN M D, HE X H, XIONG S H, et al. Reduction of JPEG compression artifacts based on DCT coefficients prediction[J]. Neurocomputing, 2020, 384:335-345.
- [31] DUTTA T, GUPTA H P. A robust watermarking framework for high efficiency video coding (HEVC)-encoded video with blind extraction process[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2016, 38:29-44.
- [32] DING H, TAO R X, SUN J, et al. A Compressed-Domain Robust Video Watermarking Against Recompression Attack[J]. IEEE Access, 2021, 9:35324-35337.



TAO Xinyu, born in 1998, postgraduate. His main research interests include information security and video digital watermarking.



XIONG Lizhi, born in 1988, Ph.D, professor, master supervisor. His main research interests include multimedia content security and digital forensics.

(责任编辑:喻黎)