

基于多域变换的视频水印嵌入算法研究

胡泽宁¹, 田益民^{2*}, 王金戈¹

¹北京印刷学院信息工程学院, 北京

²北京印刷学院基础部, 北京

收稿日期: 2025年6月20日; 录用日期: 2025年7月18日; 发布日期: 2025年7月25日

摘要

为提升视频水印在版权保护中的实际应用效果, 本文提出一种基于多域变换的视频水印嵌入算法。该算法结合离散小波变换(Discrete Wavelet Transform, DWT)与离散余弦变换(Discrete Cosine Transformation, DCT), 利用其在时频域分析与能量集中特性上的优势, 实现水印信息在频域中的鲁棒嵌入。水印嵌入前通过Arnold置乱增强安全性, 在帧图像中选取HL子带进行DWT分解, 再对其进行DCT处理, 将水印嵌入中频系数区域。实验分别在高斯噪声、椒盐噪声、剪切攻击、滤波攻击等场景下对算法的鲁棒性进行评估。结果表明, 该算法在保证水印不可见性的同时, 具备较强的抗攻击能力, 适用于数字视频的版权保护场景。

关键词

多域变换, 视频水印, 离散小波变换, 离散余弦变换, Arnold置乱

Research on Video Watermark Embedding Algorithm Based on Multi-Domain Transforms

Zening Hu¹, Yimin Tian^{2*}, Jinge Wang¹

¹School of Information Engineering, Beijing Institute of Graphic Communication, Beijing

²Foundation Department, Beijing Institute of Graphic Communication, Beijing

Received: Jun. 20th, 2025; accepted: Jul. 18th, 2025; published: Jul. 25th, 2025

Abstract

To enhance the practical application effect of video watermarks in copyright protection, this paper proposes a video watermark embedding algorithm based on multi-domain transforms. The algorithm

*通讯作者。

文章引用: 胡泽宁, 田益民, 王金戈. 基于多域变换的视频水印嵌入算法研究[J]. 计算机科学与应用, 2025, 15(7): 114-128. DOI: 10.12677/csa.2025.157186

integrates Discrete Wavelet Transform (DWT) and Discrete Cosine Transform (DCT) and leverages its advantages in time-frequency domain analysis and energy concentration characteristics to realize robust embedding of watermark information in the frequency domain. The watermark is pre-encrypted using Arnold scrambling to improve security, and the HL subbands are selected in the frame image for DWT decomposition, and then DCT is performed to embed the watermark into the mid-frequency coefficient region. Experiments are conducted to evaluate the robustness of the algorithm under the scenarios of Gaussian noise, salt-and-pepper noise, cropping attack, and filtering attack, respectively. The results show that the proposed method has strong anti-attack ability while ensuring the invisibility of the watermark, and is suitable for copyright protection scenarios of digital videos.

Keywords

Multi-Domain Transform, Video Watermark, DWT, DCT, Arnold Scrambling

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着数字化与多媒体技术的飞速发展, 图像、音频与视频等传统媒体逐步转变为以数字形式呈现, 给人们的生产与生活带来了极大便利。然而, 数字和网络媒体的普及在促进信息传播效率的同时, 也带来了新的挑战, 尤其是在数字内容的版权保护方面。由于数字作品易于复制与传播, 其版权极易受到非法个人或团体的侵犯。例如, 一些商家在未经授权的情况下非法传播作品牟利, 或司法、政府类重要文件在传输过程中遭遇篡改与伪造。这类行为严重威胁数字内容的安全性与真实性, 侵害了原始创作者的合法权益。因此, 数字水印技术应运而生, 并在近年得到广泛关注与持续发展。数字水印技术指的是将版权信息如数字、文字、图像标志等, 经由某种加密算法, 转变为秘密信息, 即数字水印, 并以一定的方式将数字水印嵌入到载体中[1]。目前, 国内外高校与研究机构已在数字视频水印方面开展了大量研究, 尤其以变换域方法为主, 致力于提升水印系统在多种攻击下的鲁棒性。已有文献中, 许多学者提出了基于多种变换域的视频或图像水印算法。万谊丹[2]基于 Arnold 置乱与 DCT 域设计了一种抗剪切攻击的图像水印算法, 展现了较强的实用性。张勤等[3]将水印分别嵌入 DWT 域的高、低频中, 增强了鲁棒性, 但仍对旋转攻击表现欠佳。徐江峰等[4]结合 QR 码、DCT 与 DWT 设计了水印算法, 虽提升了水印容量, 但由于未进行置乱处理, 仍无法抵抗剪切攻击。闻斌等[5]则提出基于图变换、DWT 与 SVD 的图像水印算法, 在面对噪声、滤波、JPEG 压缩等攻击时表现出良好的稳定性。针对安全性需求, 彭张帆[6]结合 DWT 与混沌加密设计了一种图像水印系统, 通过旋转、噪声和剪切攻击测试, 验证了其在复杂环境下的适应能力。宁国强等[7]提出的 DWT-DCT 空域水印方法可抵抗几何变形, 但其识别能力受限于水印类型, 仅支持英文字母嵌入。杨剑等[8]设计了基于 DWT 和 DCT 分块策略的双水印算法, 实现了脆弱性检测与鲁棒性增强的双重目标, 但其非盲提取方式限制了实际应用场景。在视频水印方面, Madine 等[9]将 DWT 应用于视频帧分块处理, 并通过乘法嵌入策略增强水印分布的广度, 从而提高抗攻击能力。Wagdarikar 等[10]提出的鲁棒水印算法采用小波变换与位平面分布策略, 通过多维特征筛选嵌入区域, 进一步提升了鲁棒性与抗干扰能力。Liu 等[11]采用 DWT 与 SVD 结合的方法, 构建最优嵌入位置选择策略, 有效提升了水印的峰值信噪比与抗干扰性能。黄江涛等[12]基于张量奇异值分解, 利用密钥提取帧并构建三阶张量, 将水印嵌入对角张量的奇异值中, 取得了优异的鲁棒性表现。

综上, 尽管现有视频水印算法在特定攻击场景下表现良好, 但大多数方案仅能针对某一类或少数几

类攻击手段，对复杂环境的适应性仍有待提高。因此，本文旨在设计一种融合多域变换、具备良好不可见性与鲁棒性的数字视频水印嵌入算法，以实现多种常见攻击的有效抵抗，提升数字视频版权保护的实用性和安全性。

2. 原理

2.1. 小波分析理论基础

法国物理学家 Morlet 于 80 年代首次提出小波分析的概念，随后在此基础上，Mallat 提出了多分辨率的概念和快速离散正交小波的算法，由于具有能将信号分解成不同频率的子信号，并且每个子信号具有相应的时域分辨率和进行高效的分解和重构的优势，从而广泛用于分析和处理非平稳信号的各领域中[13]。

小波分析是一种局部性的分析方法，可以在时域和频域上提供分辨率，同时能够有效处理非平稳信号。小波变换的基本思想是把图像信号分解成多个可分解的子信号，然后对每个子信号进行分析，得到图像的特征信息。小波变换有两种形式：连续小波变换和离散小波变换。

1) 连续小波变换

设 $\varphi(x)$ 为平方可积函数，若其傅里叶变换满足条件：见式(1)：

$$C_{\psi} = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\hat{\psi}(w)|^2}{|w|} dw < +\infty \quad (1)$$

那么称 $\varphi(x)$ 为“基本小波”或者“母小波”，上式为小波函数的容许条件。

设尺度因子为 a ，平移因子为 b ，设基本小波经过伸缩和平移后的函数为 $\psi_{a,b}(x)$ ，则有：

$$\psi_{a,b}(x) = |a|^{-\frac{1}{2}} \psi\left(\frac{x-b}{a}\right), a > 0, b \in R \quad (2)$$

由于 a 和 b 是取得连续变化的值，因此称 $\psi_{a,b}(x)$ 为连续小波基函数。

若 $f(x)$ 为平方可积函数，将函数 $f(x)$ 在小波基下展开。设 a 和 b 为小波基的尺度因子和平移因子，则 $f(x)$ 的连续小波变换定义为：

$$W_{\psi} f(a, b) = \{f(x), \psi_{a,b}(x)\} = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) dx \quad (3)$$

2) 离散小波变换

离散小波变换本质上是对连续小波变换中的尺度因子和平移因子进行离散化处理。将尺度因子进行离散化，即取尺度因子 $a = a_0$ ， $j \in Z$ ， $a_0 \neq 1$ ，在尺度 j 下，将平移因子均匀离散化。设 b_0 为 $j = 0$ 时的均匀采样间隔量，进行均匀离散取值。在实际应用中，通常取 $a_0 = 2$ ， $b_0 = 1$ ，则离散小波变换的定义如(4)所示：

$$W_{\psi} f(j, k) = \{f(x), \psi_{j,k}\} = 2^{\frac{j}{2}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \psi(2^j(x-k)) dx, k \in Z \quad (4)$$

其相应的逆变换为下式：

$$f(x) = \sum_{j=-\infty}^{+\infty} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} W_{\psi} f(j, k) 2^{\frac{j}{2}} \psi(2^j(x-k)) \quad (5)$$

2.2. 离散余弦变换

作为一种实变换，离散余弦变换因其具有较好的去相关性能力，且具有较强的能量压缩特性，在数

字信号处理、图像视频压缩等方面有着广泛的应用。尤其是建立在 DCT 变换的 JPEG 压缩标准上，其压缩性能较好，可实现图像尺寸与图像质量的良好平衡点，所以离散余弦变换在数字水印技术领域应用较广。

对于一幅长宽为 $M \times N$ 的图像，设空间采样值 $x=0,1,\dots,M-1$ ； $y=0,1,\dots,N-1$ ； $u、v$ 为频域采样值，则离散余弦变换公式如下式：

$$S(u,v) = c(u)c(v) \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} s(x,y) \cos\left(\frac{\pi u(2x+1)}{2M}\right) \cos\left(\frac{\pi v(2y+1)}{2N}\right) \quad (6)$$

反离散余弦变换公式如(7)所示：

$$S(x,y) = \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} c(u)c(v) S(u,v) \cos\left(\frac{\pi u(2x+1)}{2M}\right) \cos\left(\frac{\pi v(2y+1)}{2N}\right) \quad (7)$$

其中：

$$c(u) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{M}} & u = 0 \\ \sqrt{\frac{2}{M}} & u = 1, 2, \dots, M-1 \end{cases} \quad (8)$$

$$c(v) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{N}} & v = 0 \\ \sqrt{\frac{2}{N}} & v = 1, 2, \dots, N-1 \end{cases}$$

在 DCT 变换中，图像会被分成许多小块，每个小块通常是 8×8 个像素点大小。在数字水印的嵌入过程中，可改变每一小块的中频或低频系数，将水印二值图隐藏在载体图像中。其中，选择中频系数修改是因为在高频系数中嵌入水印会受到多种信号处理攻击的干扰，而在低频系数中嵌入，编码会受到人类视觉特征的影响，影响图像的视觉效果。

2.3. Arnold 置换

Arnold 变换是图像加密领域的一个经典置乱算法，所谓置乱，就是打乱图片上各个像素点的位置，以消除原图片相邻像素间的相关性。使用 Arnold 置换，使得原本有意义的图像变得无意义，故使用此变换可在数字盲水印嵌入前进行预处理，实现水印图像的加密，且针对不同的数字图像，加密者可选取对应的离散化 Arnold 矩阵进行变换。所谓图像的位置变换，是对对应点的灰度值或 RGB 颜色值的移动，即将原本点 (x, y) 处的值对应的灰度值转移到变换后的位置，进而达到置乱的效果。Arnold 变换不但能对图像进行置乱，还能对其他数据进行置乱与加密。

设 x_n 和 y_n 分别是像素原始位置的横纵坐标， n 为变换的次数。 $a、b$ 可以任意取值， mod 为模运算。 N 为图像的长或宽。由于该算法只适用于长宽相等的图像，所以长和宽都等于 N 。变换公式如(9)所示：

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & b \\ a & ab+1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \end{bmatrix} \text{mod}(N) \quad (9)$$

该算法的逆变换，即由置乱后的图像恢复到原图的变换公式如(10)所示：

$$\begin{bmatrix} x_n \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ab+1 & -b \\ -a & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} \text{mod}(N) \quad (10)$$

3. 算法设计

3.1. 总体框架

本文总体的技术路线图如图 1 所示。

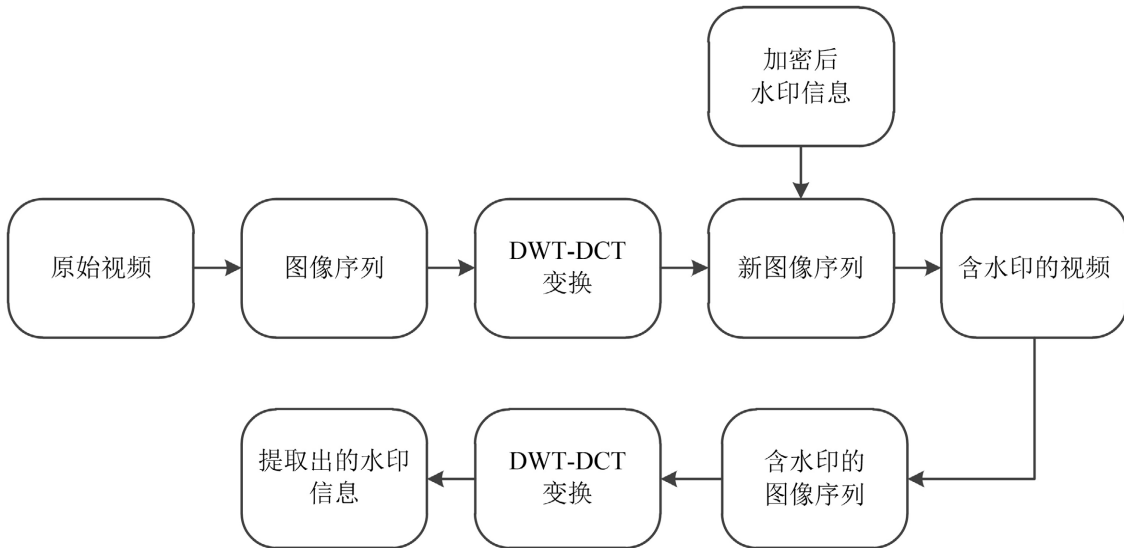


Figure 1. Overall technology roadmap
图 1. 总体技术路线图

首先，对原始视频进行解码操作，由于音频不参与水印的嵌入过程，所以利用线性编辑软件将视频和音频进行分割。随后，对分离音频后的视频进行分解，导出视频的帧图像序列。接着，对每一帧图像做 DWT 变换和 DCT 变换，把经过加密处理后的水印信息嵌入到经过 DWT-DCT 变换的系数上，便得到了嵌入水印的帧图像序列。最终与音频结合成视频。水印提取过程先将生成的视频文件用线性编辑软件进行解码，导出嵌入水印的帧图像序列，之后对每一帧按照嵌入算法的逆过程提取水印。最后，根据最终视频水印提取后的呈现效果，对算法的性能进行评估。

在视频帧图像中选择合适的嵌入区域和嵌入强度，是平衡水印的不可见性与鲁棒性的关键。本文采用基于 DWT 的三层分解，并在第一层中的 HL 子带中选取嵌入区域，对该子带再进行 DCT 变换，最终将水印嵌入其中频系数区域。该策略具有如下理论依据与优势：1) 能量分布特性：DWT 分解后，图像的大部分能量集中在 LL 子带，而 HL、LH、HH 子带则包含较多纹理与边缘信息，适合嵌入水印。2) 感知敏感性较低：HL 子带反映图像中垂直方向的细节信息，人眼对其变化相对不敏感，因此嵌入水印不会明显降低图像质量。3) 平衡性：相较于 HH 子带过于敏感，LL 子带过于重要，HL 子带提供了一种鲁棒性与不可见性相对均衡的区域。4) 低频系数对图像影响大，修改会造成明显失真；高频系数在压缩或攻击中易被削弱，鲁棒性差；中频系数具有结构稳定性，在常见攻击(如压缩、加噪、剪切)中表现出较好的抗扰性，适合承载水印。

3.2. 视频水印的嵌入与提取

本文使用 Arnold 变换完成水印的置乱。改变水印图像每个像素点的位置，得到置乱后的水印矩阵，以置乱次数作为密钥保存。

取 $a = 1$ 、 $b = 1$ 时，代码实现如下：

```

for i=1:15
    for y=1:h
        for x=1:w
            xx=mod((x-1)+b*(y-1), N)+1; %mod 取余操作, (a, b)就是 a 除以 b 的余数
            yy=mod(a*(x-1)+(a*b+1)*(y-1), N)+1;
            W1(yy, xx)=img1(y, x);
        end
    end
    img1=W1;
end

```

本文结合 DCT 变换域 DWT 变换, 采用灰度图像作为水印信息, 提出了一种基于 DCT 变换和 DWT 变换的数字视频水印算法, 视频水印的嵌入与提取的步骤如下。

1、视频水印嵌入步骤

Step 1: 利用线性编辑软件 Adobe Premiere 对原视频进行解码, 获得帧图像序列。

Step 2: 对视频的每一帧嵌入水印, 具体流程如下:

1) 对原始视频剪切分帧获得帧图像序列, 对每一帧进行离散小波变换, 得到 4 个子带: LL、LH、HL、HH, 综合考虑不可见性和鲁棒性后, 选择在 HL 子带中进行下一步变换。

2) 在 HL 系数组成的矩阵中进行分块, 每个分块是 8×8 个像素点大小, 即每个块包含 64 个像素点, 随后对分块后的矩阵计算离散余弦变换。

3) 在经 DCT 变换后的每个图像子块中, 选取一个中频系数, 再随机选择该点周围的 6 个系数。在第 K 块中选取一个中频系数, 设为 $y(i, j)$, 选取其周围的 6 个系数, 分别为 $y(i+3, j-3)$ 、 $y(i+2, j-2)$ 、 $y(i+1, j-1)$ 、 $y(i-1, j+1)$ 、 $y(i-2, j+2)$ 、 $y(i-3, j+3)$, 计算其平均值 $aver$ 。设 $watermarkImage(i, j)$ 为经过 Arnold 置乱变换后的水印图像, $strength$ 为嵌入强度。然后对每一个 $y(i, j)$ 做嵌入运算:

$$\begin{cases} y(i, j) = aver - strength, & watermarkImage(i, j) = 0 \\ y(i, j) = aver + strength, & watermarkImage(i, j) = 1 \end{cases} \quad (11)$$

4) 将 DCT 域嵌入水印后的每一个子块进行 DCT 变换的逆变换, 然后进行 DWT 变换的逆变换, 得到嵌入水印的帧图像。

5) 将嵌入水印的帧图像序列导入 pr 软件进行重新编码, 进一步得到嵌入水印的视频。

2、水印提取步骤

Step 1: 用 pr 软件将嵌入水印的视频解码, 导出嵌入水印的帧图像序列, 对嵌入水印的每一帧图像进行 DWT 变换, 选取 HL 子带, 将其分为 8×8 个像素点大小的块, 并依次对嵌入水印的块进行 DCT 变换。

Step 2: 在 DCT 变换后的系数中, 找出嵌入水印信息的中频系数的位置 $y(i, j)$, 计算其周围 6 个系数的平均值 $aver'$ 。

Step 3: 按照运算(12)提取水印:

$$\begin{cases} \text{若 } y'(i, j) < aver', & \text{则 } watermarkImage(i, j) = 0 \\ \text{若 } y'(i, j) > aver', & \text{则 } watermarkImage(i, j) = 1 \end{cases} \quad (12)$$

Step 4: 对提取出来的水印图像进行解密, 得到水印图像。

4. 实验结果与分析

4.1. 实验设置

本实验采用两个 MP4 格式的视频，分别为“billkin”和“king”，billkin 视频的分辨率为 1024×1024 ，帧率为 25，视频长度为 4 秒，帧数为 100 帧；king 视频的分辨率为 1920×1080 ，帧率为 25，视频长度为 3 秒，帧数为 75 帧。水印图像为灰度图像，大小为 64×64 ，格式为 bmp。实验视频来自网络视频片段，本文截取了其中的一段用于水印算法测试与验证。

4.2. 不可见性分析

随着嵌入水印强度的增大，水印抵抗攻击的能力增强，但图像的视觉效果变差，因此，实际操作时需对嵌入强度的取值进行不断调整，寻取不可见性与鲁棒性均较好的定值。平衡考虑不可见性和鲁棒性，嵌入强度选择 15，图 2 和图 3 展示了两个视频中，嵌入强度为 15 时的原始视频帧和嵌入水印的视频帧。



Figure 2. Comparison of the original video frame of billkin video and the video frame with embedded watermark
图 2. billkin 视频的原始视频帧和嵌入水印后的视频帧对比图



Figure 3. Comparison of the original video frame of king video and the video frame with embedded watermark
图 3. king 视频的原始视频帧和嵌入水印后的视频帧对比图

此时，billkin 视频的 PSNR = 49.8426 dB；king 视频的 PSNR = 46.9095 dB。通过人眼观察，无法察觉出明显差别，此时水印的不可见性较好。嵌入水印后的视频图像 1~75 帧的水印图像 NC 值均在 0.99 以上，提取的水印和原始水印几乎没有差异。所以，此算法的不可见性良好。

4.3. 鲁棒性分析

本文选取以下几类攻击，来检验嵌入水印的载体视频遭受攻击后的视频质量以及水印的鲁棒性。将攻击后的帧图像序列与原图像进行比对计算峰值信噪比，从攻击后的帧图像中提取水印，并计算其与原始水印图像的相关性系数，来检验算法的鲁棒性。

1) 噪声攻击

椒盐噪声是一种随机噪声模型,其在图像中随机添加黑白像素点,使得图像中的一些像素点变得十分明显且不规则。高斯噪声是一种常见的连续随机噪声模型,其数学模型符合高斯分布(正态分布)。高斯噪声在图像中引入随机的亮度变化,使得图像的亮度和颜色发生微弱的变化,以及出现模糊和失真的情况。图4是对 billkin 视频的每一帧进行高斯噪声、椒盐噪声后,提取出来的帧图像和其解密后的水印。高斯噪声后的 PSNR = 29.9234, NC = 0.9769; 椒盐噪声后的 PSNR = 32.1378, NC = 0.9886。



Figure 4. Carrier image of the billkin video after being attacked and its decrypted watermark
图 4. billkin 视频遭受攻击后的载体图像和其解密后的水印

图5是对 king 视频的每一帧进行高斯噪声、椒盐噪声后,提取出来的帧图像和其解密后的水印。实验结果为:高斯噪声后的 PSNR = 29.9105, NC = 0.9802; 椒盐噪声后的 PSNR = 32.1760, NC = 0.9842。

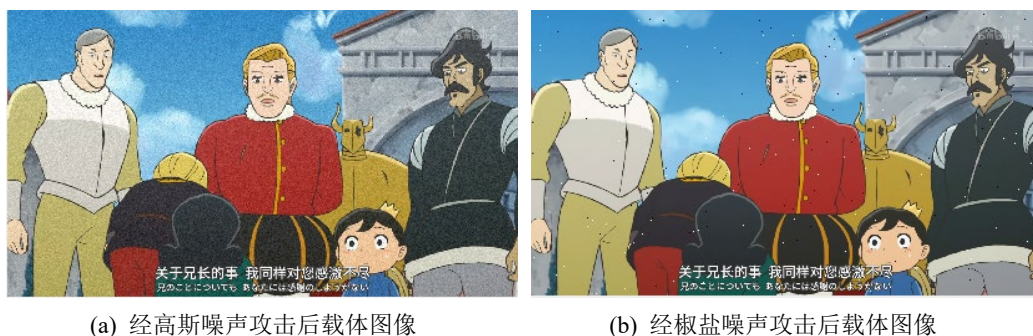




Figure 5. Carrier image of the king video after being attacked and its decrypted watermark
图 5. king 视频遭受攻击后的载体图像和其解密后的水印

2) 滤波攻击

滤波攻击是一种常见的简单攻击，其原理是通过使用一种特定的滤波器来修改图像中的像素值，以掩盖或隐藏被嵌入的秘密信息。常见的空域滤波器有：均值滤波器、高斯低通滤波器等。

对两个视频每一帧进行高斯低通滤波攻击，图 6 为攻击后 billkin 视频和 king 视频的任意一帧和该帧提取出的水印图像。实验结果分别为：PSNR = 37.5091，NC = 0.9880 和 PSNR = 32.1134，NC = 0.9362。

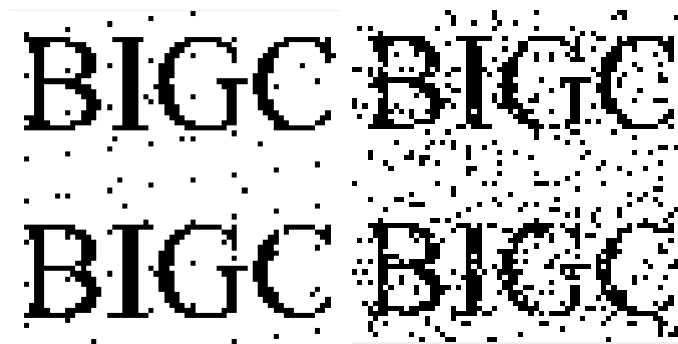


Figure 6. Watermarks of the two videos after Gaussian filtering and decryption of the carrier image
图 6. 两个视频遭受高斯滤波后载体图像解密后的水印

对两个视频每一帧进行均值滤波攻击，图 7 为两个视频遭受攻击后的任意一帧和该帧提取出的水印图像。实验结果分别为：PSNR = 33.2457，NC = 0.9078 和 PSNR = 26.9615，NC = 0.8539。



Figure 7. Watermark of the two videos after mean filtering and decryption of the carrier image
图 7. 两个视频遭受均值滤波后载体图像解密后的水印

3) 剪切攻击

对两个视频每一帧图像进行剪切攻击，剪切图像左上角后，billkin 视频的 PSNR 值降为 24.4451，NC 值为 0.9824；king 视频的 PSNR 值降为 19.1669，NC = 0.9953。但是仍可以提取出比较完整的水印图像，如图 8 和图 9 所示。



Figure 8. billkin video frame after cutting the upper left corner and the extracted watermark
图 8. billkin 视频经过剪切左上角部分后的视频帧和提取出的水印



Figure 9. king video frame after cutting the upper left corner and the extracted watermark
图 9. king 视频经过剪切左上角部分后的视频帧和提取出的水印

剪切 billkin 视频帧图像中心部分，PSNR = 10.8435，NC = 0.9714，如图 10 所示。



Figure 10. billkin video frame after cutting the center part and the extracted watermark
图 10. 经过剪切中心部分后的 billkin 视频帧和提取出的水印

剪切 king 视频帧图像中心部分, $PSNR = 13.3678$, $NC = 0.9746$, 如图 11 所示。



Figure 11. king video frame after cutting the center part and the extracted watermark
图 11. 经过剪切中心部分后的 king 视频帧和提取出的水印

剪切 billkin 视频帧图像边缘部分, $PSNR = 8.9939$, $NC = 0.9452$, 如图 12 所示。



Figure 12. billkin video frame after cutting the edge part and the extracted watermark
图 12. billkin 视频经过剪切边缘部分后的视频帧和提取出的水印

剪切 king 视频帧图像边缘部分, $PSNR = 9.8623$, $NC = 0.9633$, 如图 13 所示。



Figure 13. king video frame after cutting the edge part and the extracted watermark
图 13. king 视频经过剪切边缘部分后的视频帧和提取出的水印

帧图像经过剪切左上角、中心部分、边缘部分后, 图像有一部分缺失, 影响了视觉效果。但在水印

嵌入前, 对水印进行了 Arnold 置乱, 使水印信息分散在各个载体块中, 所以算法可以一定程度上抵抗剪切攻击, 可以提取出比较完整的水印图像, 其 NC 值均大于 0.9, 鲁棒性较好。

4) 缩放攻击

缩放攻击通过改变图像或视频的尺寸大小来破坏其完整性和可识别性。对两个视频每一帧图像进行缩放比例为 0.4 的缩放攻击, 视频帧变得模糊, 视觉效果受到影响, 但是仍然可以提取出完整的水印, NC 值分别为 0.8742 和 0.9069, 如图 14 所示。



Figure 14. Watermarks extracted from two videos after the scaling attack

图 14. 两个视频经过缩放攻击后提取出的水印

5) 针对帧攻击

针对视频帧攻击的防御是数字视频水印技术的一个重要应用方向。视频帧攻击可以包括像素修改、帧重组和帧删除等操作, 如图 15 所示, 这些攻击会破坏视频帧的完整性和真实性, 进而影响视频内容的安全。本文采用在每一帧都嵌入数字水印的方法, 经过帧重组或帧删除攻击, 水印信息依然存在于每个帧中, 所以可以实现水印的提取, 实现对视频的保护。

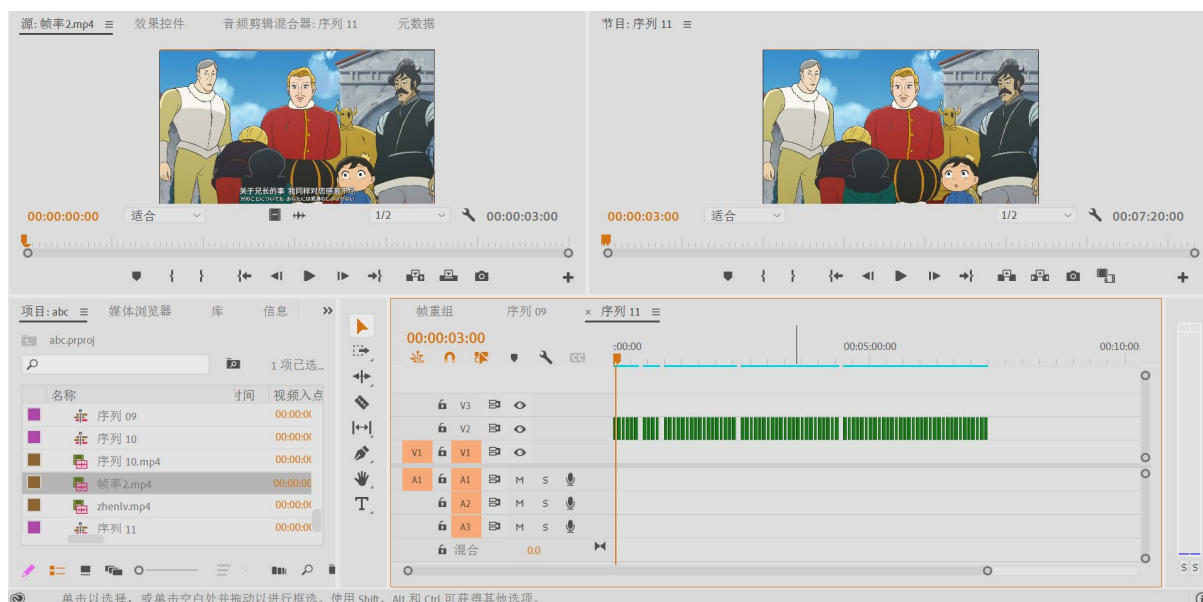


Figure 15. Randomly swap video frames operation

图 15. 随机交换视频帧操作

6) 帧率变化

视频的帧率变化可能会对水印的鲁棒性产生影响。为了评估水印的鲁棒性, 将 billkin 视频和 king 视频的帧率改为 30, 然后进行水印嵌入和提取操作。然后把提取到的水印信息与原始水印进行对比, billkin 视频的 PSNR = 32.9580, NC = 0.9901; king 视频的 PSNR = 29.8199, NC = 0.9916, 如图 16 所示。

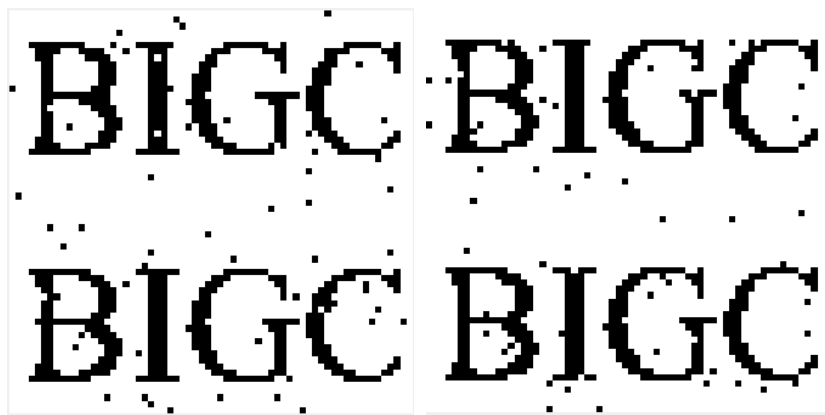


Figure 16. Watermarks extracted from two videos after changing the frame rate
图 16. 两个视频改变帧率后提取出的水印

7) 运动模糊

运动模糊是由于物体或相机的运动而导致的图像模糊。为了分析水印对运动模糊的鲁棒性, 使用运动模糊滤镜对两个视频进行处理, 并进行水印提取。然后与原始水印进行对比, 评估水印提取的准确性, 得到 billkin 视频的 PSNR = 38.5425, NC = 0.9309; king 视频的 PSNR = 25.0188, NC = 0.8990, 如图 17 所示。



Figure 17. Video frames after the video is passed through the motion blur filter and the extracted watermark
图 17. 视频经过运动模糊滤镜后的视频帧和提取出的水印

8) 视频压缩

视频压缩算法会对视频进行有损压缩, 可能导致水印信息的丢失或损坏。为了评估水印对视频压缩的鲁棒性, 改变目标比特率对视频的每一帧进行压缩, 调整比特率为 0.74 Mbps, 以控制视频的压缩质量和文件大小, 并进行水印提取。然后与原始水印进行对比, 评估水印提取的效果, 得到 billkin 视频的 PSNR = 31.5557, NC = 0.8605; king 视频的 PSNR = 30.2089, NC = 0.9072, 如图 18 所示。



Figure 18. Watermarks extracted from two videos after compression

图 18. 两个视频经过压缩后提取出的水印

9) 分辨率变化

视频的分辨率变化可能会对水印的鲁棒性产生影响。为了评估水印的鲁棒性,本文实验通过选取两个不同分辨率的视频,并在每个分辨率上进行水印嵌入、提取和攻击操作,综合以上实验结果,该算法在不同分辨率下仍具有较强的鲁棒性和不可见性。

综合以上实验结果表明,该算法不仅能够抵抗常见的噪声、滤波、剪切、缩放等攻击,而且能够抵抗部分针对帧攻击以及视频在传输过程中可能遭受的帧率变化、分辨率变化、运动模糊、压缩等攻击,在各种攻击下具有较好的鲁棒性。通过对视频进行多种攻击,发现对视频的视觉效果影响较小,仍然具有较强的不可见性,也印证了算法的有效性。

基金项目

本研究得到以下两个项目的支持:北京市教育委员会科技一般项目(KM202110015001);北京印刷学院重点教学改革项目——工程认证背景下的工科数学教学改革对大学生创新思维与创业能力培养的研究与实践。

参考文献

- [1] 王俊龙. 一种 DCT 域原始视频水印算法研究及实现[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉纺织大学, 2012.
- [2] 万谊丹. 基于 Arnold 和 DCT 的抗剪切攻击图像水印研究[J]. 网络安全技术与应用, 2021(8): 40-41.
- [3] 张勤, 崔丽. 基于 DWT 的一种数字水印算法[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2015, 51(1): 19-22.
- [4] 徐江峰, 张守强. 基于 QR 码的 DWT-DCT 数字水印算法[J]. 计算机应用研究, 2018, 35(5): 1540-1544.
- [5] 闻斌, 张天骐, 熊天, 等. 基于图变换和 DWT-SVD 的鲁棒图像水印算法[J]. 光电子·激光, 2022, 33(8): 879-886.
- [6] 彭张帆. 基于 DWT 和混沌加密的数字水印算法研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 广东工业大学, 2021.
- [7] 宁国强, 刘媛媛, 李凤堂, 等. 一种基于 DWT-DCT 变换强鲁棒性的数字水印算法[J]. 电子设计工程, 2009, 17(11): 67-69.
- [8] 杨剑, 朱莉. 基于分块的 DCT 域和 DWT 域的双水印算法改进[J]. 电子设计工程, 2016, 24(18): 145-148.
- [9] Madine, F., Akhace, M.A. and Zarmehi, N. (2018) A Multiplicative Video Watermarking Robust to H.264/AVC Compression Standard. *Signal Processing: Image Communication*, **68**, 229-240. <https://doi.org/10.1016/j.image.2018.06.015>
- [10] Wagdarikar, A.M.U. and Senapati, R.K. (2019) Optimization Based Interesting Region Identification for Video Watermarking. *Journal of Information Security and Applications*, **49**, Article ID: 102393. <https://doi.org/10.1016/j.jisa.2019.102393>
- [11] Liu, Q., Yang, S., Liu, J., Xiong, P. and Zhou, M. (2020) A Discrete Wavelet Transform and Singular Value Decomposition-Based Digital Video Watermark Method. *Applied Mathematical Modelling*, **85**, 273-293. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2020.04.015>

- [12] 黄江涛, 孙辛烨, 马叶灵, 等. 基于张量奇异值分解的鲁棒视频水印算法[J]. 宁波大学学报(理工版), 2022, 35(5): 79-85.
- [13] 李云龙. 基于小波变换的视频水印技术[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2012.