

基于混合DWT-DCT与帧分组的视频双域水印算法

梁钰承^{1,2,3}, 钮可^{2,3}, 李军^{2,3}, 孟逸飞^{1,2,3}

(1. 信息工程大学, 河南 郑州 450001;

2. 武警部队信息安全重点实验室, 陕西 西安 710086; 3. 武警工程大学密码工程学院, 陕西 西安 710086)

摘要: 针对现有视频水印算法的鲁棒性与可逆性的兼容问题, 提出了一种基于混合DWT-DCT与帧分组的视频双域水印算法。该算法基于H.264视频编码标准, 提出一种视频双域水印框架, 以视频帧的场景平滑度为标准对视频帧进行分组, 在各分组中决策出符合标准的可嵌入帧作为隐秘帧用于水印嵌入, 同时对隐秘帧进行混合DWT-DCT生成水印嵌入域。通过鲁棒嵌入方法将鲁棒水印嵌入Y通道低频嵌入域中; 在Y通道高频嵌入域, 通过直方图迁移技术嵌入可逆水印。最终在解码端实现水印的提取与信息完整性认证及原始视频的无损恢复。通过实验结果表明, 所提算法具有良好的不可见性, 各实验视频的嵌入帧的平均峰值信噪比与平均结构相似度的均值分别为49.009 2 dB与0.984 0, 对不同强度的失真噪声攻击与帧攻击均具有强鲁棒, 提取水印与原始水印的平均归一化互相关系数均在0.993 3以上, 平均误码率均在0.058 2以下, 同时计算复杂度低, 实验视频单位帧编码的时间差均小于0.033 s, 单位帧解码时间差均小于0.025 s, 具有较高的应用价值。

关键词: 视频双域水印框架; 场景平滑度; 混合DWT-DCT; Y通道; H.264编码

中图分类号: TP393

文献标志码: A

DOI: 10.11959/j.issn.2096-109x.2025010

Video dual-domain watermarking algorithm based on hybrid DWT-DCT and frame grouping

LIANG Yucheng^{1,2,3}, NIU Ke^{2,3}, LI Jun^{2,3}, MENG Yifei^{1,2,3}

1. Force Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China

2. Key Laboratory of Information Security of the Chinese People's Armed Police Force, Xi'an 710086, China

3. College of Cryptographic Engineering, Engineering University of the Chinese People's Armed Police Force, Xi'an 710086, China

Abstract: Aiming to address the compatibility of robustness and reversibility in existing video watermarking algorithms, a video dual-domain watermarking algorithm based on hybrid DWT-DCT and frame grouping was proposed. The algorithm, which was based on the H.264 video coding standard, introduced a video dual-domain watermarking framework. Video frames were grouped according to their scene smoothness, and within each group,

收稿日期: 2024-04-01; 修回日期: 2024-07-16

通信作者: 钮可, niuke@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(62202496, 62272478)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (62202496, 62272478)

引用格式: 梁钰承, 钮可, 李军, 等. 基于混合DWT-DCT与帧分组的视频双域水印算法[J]. 网络与信息安全学报, 2025, 11(1): 106-128.

Citation Format: LIANG Y C, NIU K, LI J, et al. Video dual-domain watermarking algorithm based on hybrid DWT-DCT and frame grouping[J]. Chinese Journal of Network and Information Security, 2025, 11(1): 106-128.

frames meeting the predefined criteria were selected as hidden frames for watermark embedding. The hidden frames were processed using a hybrid DWT-DCT approach to generate the watermark embedding domain. Robust watermarking was embedded into the low-frequency domain of the Y channel using a robust embedding method, while reversible watermarking was embedded into the high-frequency domain of the Y channel through histogram migration techniques. At the decoding end, watermark extraction and lossless recovery of the original video were achieved. Experimental results demonstrate that the proposed algorithm exhibits excellent invisibility, with the average peak signal-to-noise ratio and average structural similarity index of the embedded frames being 49.009 2 dB and 0.984 0, respectively. The algorithm is shown to be robust against distortion noise attacks and frame attacks of varying intensities. The average normalized correlation between the extracted watermark and the original watermark is above 0.993 3, while the average bit error rate is below 0.058 2. Additionally, the computational complexity is low, with the time difference for unit frame encoding and decoding being less than 0.033 s and 0.025 s, respectively. These results indicate that the proposed algorithm has high application value.

Keywords: video dual-domain watermarking framework, scene smoothness, hybrid DWT-DCT, Y channel, H.264 encoding

0 引言

随着计算机技术的迅速发展, 互联网对多媒体水印技术的需求越来越大^[1], 网络上有大量的免费图片^[2-3]与视频需要版权保护和所有权验证^[4-5]。视频水印技术提供了一种区别于密码技术的视频版权保护技术, 通过在数字视频中标记水印信息。视频水印本身一般涵盖版权所有者的信息, 这些信息可以是商标图片、序列号或任何其他描述版权的数字信息^[6]。在实际应用中, 针对嵌入水印后数字视频会造成不可逆的失真问题, 可逆水印 (reversible watermarking, RW) 被提出, 该技术支持提取水印后无损恢复载体。在算法设计时, 应尽量将嵌入失真最小化, 并在保持一定嵌入容量的情况下保证其在信息提取后的可逆性, 鲁棒性一般不作为考虑的重点, 轻微失真也可能导致无法正确提取水印^[4]。为了改善这个缺陷, 鲁棒可逆水印 (Robust reversible watermarking, RRW) 被提出: 解码器端在无人攻击的情况下完成水印的提取与载体的恢复; 若载体受到攻击, 在可能丧失可逆性下仍能保证水印的正确提取, 并提示载体已经被篡改。Coltuc 等^[7-8]建立了 RRW 的一般框架, 通过先后嵌入水印信息与辅助信息, 达到算法的鲁棒性与可逆性兼顾。Wang 等^[9]在 Coltuc 的水印算法的基础上提出了基于独立嵌入域 (independent embedding domain, IED) 的两阶段图像 RRW 框架: 原始载体通过 Haar 小波变换被分解为高频 (HH) 与

低频 (LL) 两个独立的子嵌入域, 并分别在两个 IED 中进行嵌入。Wang 等的实验结果表明, 通过 RRW 框架能够有效解决两种嵌入在同一嵌入域内相互影响的问题^[9]。在视频鲁棒水印方面, Hazim 等^[10]通过二维小波变换将视频分成 4 个子带, 分别对其进行 DCT 变换, 通过设定的幅度因子控制水印嵌入强度, 在中频系数中嵌入信息。Chen 等^[11]对帧进行分组, 将嵌入帧分成非重叠块, 对块进行奇异值分解并计算 Zernike 矩的嵌入水印。Fan 等^[12]结合非零量化系数和能量因子来选择合适的色度子块, 提出一种将水印嵌入 DCT (discrete cosine transform) 量化系数中的优化调制方法, 以最小化子块的修改次数。Takale 等^[13]通过离散小波变换 (discrete wavelet transform, DWT) 和关键分量检验相结合提高水印的灵活性。Farri 等^[14]通过 Contourlet 变换和奇异值分解 (SVD) 结合的方法在视频低频子带嵌入水印。但当前面向视频的 RRW 算法却并不多见。

如今娱乐文化快速发展, 作为新兴娱乐载体的短视频成为重要的信息传播媒体, 短视频的版权保护和防篡改成为亟待解决的问题^[4]。设计兼顾鲁棒性和可逆性的水印算法具有重要实用价值。其中 H.264(AVC) 视频编码标准是目前最常用的视频压缩标准, 具有良好的压缩效率与兼容性, 被广泛应用在短视频数据传输中, “Tik Tok” 短视频的编码标准就是 AVC。本文受 Wang 等^[9]的 RRW 框架的启发, 结合视频域中的多个独立

冗余域,提出了一种面向数字视频的视频双域水印(video dual-domain watermarking, VDW)框架,设计了一种面向H.264视频编码标准的、基于混合DWT-DCT与帧分组的VDW算法。该算法通过设计场景平滑度分组机制对视频帧进行分组,在每个分组内选择隐秘帧作为水印嵌入帧,并通过混合DWT-DCT将鲁棒水印嵌入低频子带域,然后计算鲁棒水印嵌入后产生的部分信息作为辅助信息,组合成可逆水印并嵌入高频子带域。在保证水印鲁棒性的同时实现视频信息完整性认证及原始视频的无损恢复。与现有水印算法相比,本文从不可见性、鲁棒性、计算复杂度3个方面分析了所提算法的性能。本文算法的贡献如下。

1) 优化了图像RRW框架,实现了一种面向数字视频的多嵌入域水印算法,为原始视频提供了一种信息完整性认证及无损恢复的能力。

2) 设计了一种视频帧分组的标准,用于挑选出水印嵌入的关键帧,提高了本文水印算法的不可见性。

3) 提出了二维离散小波变换(2D-DWT)与二维离散余弦变换(2D-DCT)两种频域变换的混合使用,用于生成水印嵌入域,更大限度利用了频域冗余,强化了本文水印算法的鲁棒性。

4) 结合RS(reed-solomon)编码的纠错技术,强化了所提水印算法的安全性。

1 理论基础

1.1 视频双域水印框架

本文提出的视频双域水印框架的关键思想在于IED。具体来说,将原始视频转换为两个IED

用于双域水印的嵌入,一个用于鲁棒水印的嵌入,另一个用于可逆水印的嵌入,具体操作如下。

通过频域变换 F 将原始视频变换成两个嵌入域 X^n 和 X^r ,即 $F = (X^n, X^r)$ 。两个嵌入域相互独立,分别用于鲁棒水印和可逆水印的嵌入。此时的频域变换 F 是可逆的。

嵌入过程包括两个阶段,如图1所示。第一阶段,通过一种鲁棒的嵌入方法将鲁棒水印 W 嵌入 X^n 中,得到 Y^n 。此时, X^r 不进行嵌入操作,保持不变,取 $Y^r = X^r$ 。第二阶段,将鲁棒水印嵌入后的标量信息形成可逆水印 M ,最终使用可逆的嵌入方法将 M 嵌入 Y^r 中得到 Z^r 。此时, Y^n 不进行嵌入操作,保持不变,取 $Z^n = Y^n$ 。最后根据 F 的逆变换得到标记视频 Z ,即 $Z = F^{-1}(Z^n, Z^r)$ 。

在解码器中,当标记视频 Z 无失真时可以提取双域水印并提示用户视频合法权益未被侵害,从而恢复原始视频。首先用 F 将标记视频 Z 分解为两个IED,即 Z^n 与 Z^r ,根据可逆水印的提取与原始视频的恢复过程,得到 M 和 Y^r 。从嵌入过程的反向过程看,取 $Y^n = Z^n$,从 Y^n 中提取鲁棒水印 W , Y^n 通过可逆水印 M 的协助,去除鲁棒水印嵌入留存的失真,恢复为 X^n 。最后,原始视频恢复为 X ,即 $X = F^{-1}(X^n, X^r)$ 。

当标记视频 Z 失真时,因为 M 的脆弱性导致无法被正常提取,即原始视频无法恢复,并提示用户此时视频已被攻击,并从失真的 Z 中直接提取鲁棒水印 W 。

1.2 混合DWT-DCT

基于2D-DWT的水印方法,是通过将帧分

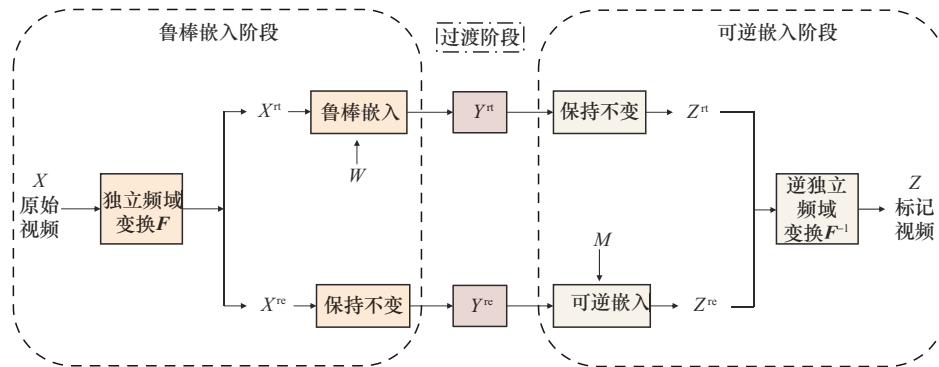


图1 视频双域水印框架

Figure 1 Video dual-domain watermarking framework

解为不同频率的子带并进行水印嵌入来达到版权保护目的。其中，高频子带通常包含帧的细节信息，而低频子带包含帧的整体特征^[15]。2D-DWT在实际应用中，通过去除表现为噪声的高频分量，保留重要的低频分量，以此实现视频的有损压缩，减小文件大小而保持较高的视觉质量。

2D-DCT^[16]实现空域到频域的变换，提供了与2D-DWT类似的消除冗余的方法。基于2D-DCT的水印方法通过将视频帧进行分块并经2D-DCT再量化，得到压缩后的帧并进行水印嵌入，最终减弱或去除了帧内数据的相关性，实现了该方法的鲁棒性。

与2D-DCT相同，经2D-DWT后的帧的主要能量集中在左上角的低频部分，同时低频部分与高频部分相互独立，编码效率高，与此前的频域变换相比拥有更高的效率，为视频水印的嵌入提供了可利用的冗余。本文算法通过结合2D-DWT与2D-DCT两种频域变换，对视频帧先进行2D-DWT获得LL子带与HH子带，再对所获得的子带进行2D-DCT处理，获得两种子带的DCT域系数并抽取其中的Y通道分量，最终将鲁棒水印与可逆水印分别嵌入两种子带分量中。与传统的单频域变换水印算法相比，这样做能够更加充分地利用视频帧的频域信息，以提高水印对各种图像处理（噪声攻击、压缩攻击等）的抵抗性，进一步强化算法的鲁棒性，同时通过混合DWT-DCT的重叠处理，能够提高双域水印的安全性与隐蔽性。相较于单频域变换的视频水印算法，基于混合DWT-DCT的本文算法除了鲁棒性的提升，还能够有效降低基于单频域变换的水印嵌入对视频帧的质量影响，强化了本文算法的不可见性，从而保护视频的完整性。其中，2D-DCT将LL子带上的低频分量压缩到更少的系数中，提高了系数串的熵，因此LL子带的DCT系数通常具有较高的熵，令鲁棒水印信号与隐秘帧的信号之间的差异更难以被检测，这使得其中的鲁棒水印更难被检测。

1.3 水印纠错编码

RS码^[17]是一种纠错性能很强的线性纠错码，能够同时纠正比特串中多个随机错误和突发错误。为提高双域水印的容错率，本文算法在双域水印比特串嵌入前对其中的鲁棒水印比特串 W 与

可逆水印比特串 M 进行了无损RS编码处理，具体操作如下。

$$m(x) = m_{k-1}x^{n-1} + \dots + m_1x^{2t+1} + m_0x^{2t} + 0 \cdot x^{2t-1} + 0 \cdot x + 0 \quad (1)$$

$$g(x) = \prod_{j=0}^{2t-1} (x - a^j) \quad (2)$$

$$m(x) \% g(x) = p_{2t-1}x^{2t-1} + p_1x + p \cdot 0 \quad (3)$$

$$c(x) = m(x) + m(x) \% g(x) \quad (4)$$

其中， $m(x)$ 表示原始双域水印中0、1比特串的对应多项式，并以8bit为一个symbol码元。 $g(x)$ 为 $m(x)$ 对应的本原生成多项式。 $c(x)$ 为原始双域水印的编码多项式。其中， $2t$ 为纠错位长度，对应纠错码纠错能力。 k 为原始水印对应的symbol数量， n 为编码序列的symbol数量， $a=2$ 。RS码的好处在于，一个symbol内的错误位数量与总错误位数量无关，均识别为一个symbol错误，容错率高，对解决突发错误具有很好效果。因此，本文利用RS码对双域水印进行编码预处理，进一步提高双域水印的鲁棒性。

2 算法框架的设计与分析

本节介绍VDW算法的框架，并提出一种场景平滑度分组机制（scene smoothness grouping mechanism, SSGM）与隐秘帧选择器（hidden frame selector, HFS）。在本文算法中，隐秘帧的选择十分重要，若随意选择隐秘帧或在每一帧中嵌入水印，易使得水印信息被不法用户发现，同时视频的码率会明显增大。因此，选择嵌入位置的隐秘帧尤为重要。本文算法基于VDW框架，将视频帧进行分组，选择组内平滑帧作为隐秘帧。

2.1 算法框架

本文算法分为3个阶段，如图2所示。第1阶段是隐秘帧选择阶段，首先通过场景检测机制将原始视频的帧进行分组，并根据制定的隐秘帧选择标准选择嵌入帧，形成隐秘帧集合 X ，并将不符合标准的帧暂时舍弃。

第2阶段是嵌入阶段，通过混合DWT-DCT获取 X 中的两个嵌入域： X^L 与 X^H 。两个嵌入域相互独立，用于独立嵌入鲁棒水印 W 与可逆水印 M 。其中嵌入阶段分为两个子嵌入阶段。在第一子阶段中，通过鲁棒控制因子 α 控制嵌入强度的嵌入方法，将鲁棒水印 W 嵌入 X^L 中得到 Y^L 。在这个

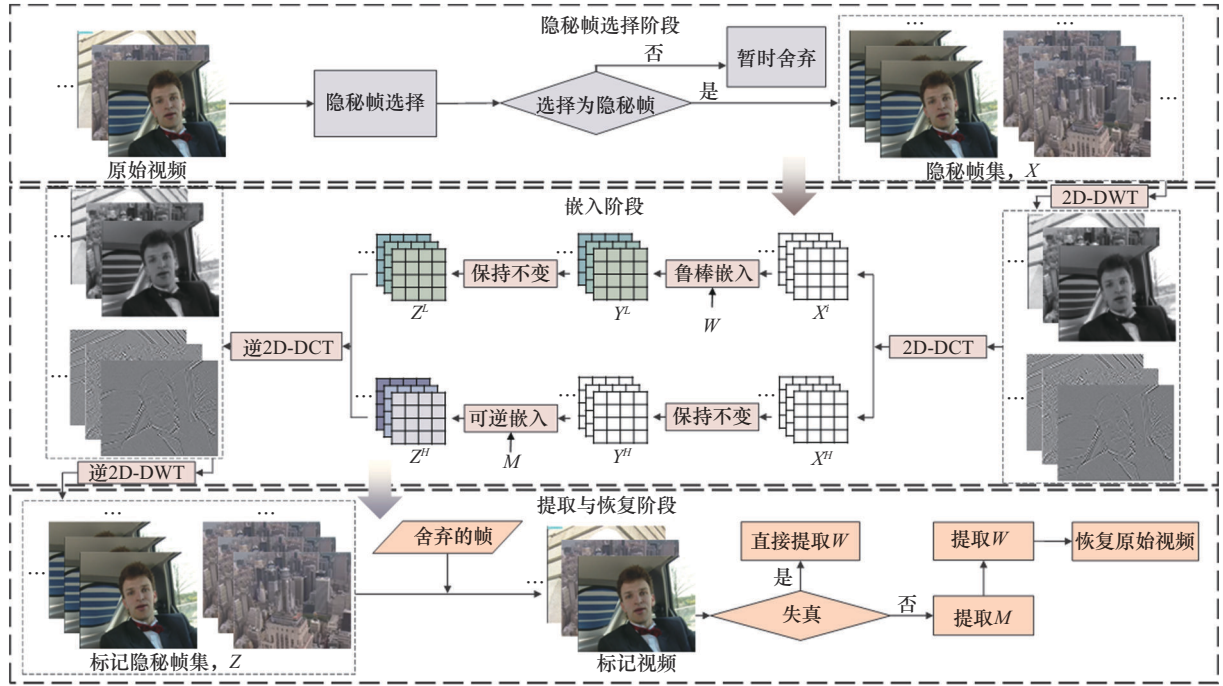


图2 VDW 算法框架

Figure 2 The algorithm framework of VDW

子嵌入阶段中, X^H 是不变的, 取 $Y^H = X^H$ 。在第二子嵌入阶段中, 生成辅助信息, 用于将 Y^L 恢复为 X^L , 并形成可逆水印 M , 通过可逆的嵌入方法将 M 嵌入 Y^H 中, 生成 Z^H 。在这个子嵌入阶段中, Y^L 是不变的, 取 $Z^L = Y^L$ 。最后通过混合 DWT-DCT 的逆变换过程生成水印标记帧集合 Z 。

第3阶段是提取与恢复阶段, 将 Z 与第一阶段暂时丢弃的帧合并生成标记视频。若标记视频没有扭曲失真, 执行第二阶段的逆反过程: 对标记视频中的水印标记帧集合 Z 进行混合 DWT-DCT, 得到两个嵌入域 Z^L 与 Z^H , 再通过可逆水印的提取操作获得 M 与 Y^H ; 对 $Y^L = Z^L$ 进行鲁棒水印 W 的提取, 并通过 M 去除鲁棒嵌入失真, 将 Y^L 恢复为 X^L ; 将 $X^H = Y^H$ 与恢复的 X^L 通过混合 DWT-DCT 的逆变换过程恢复原始视频帧, 并与丢弃帧结合为原始视频。若标记视频受到攻击造成失真, 从失真的标记视频中直接提取鲁棒水印 W 。此时, 在失真的情况下, 鲁棒水印依然能够被正确提取, 不受第二子嵌入阶段的失真影响。

2.2 噪声分析

目前, 大部分视频鲁棒水印算法的嵌入域单一^[18-23], 易造成鲁棒性弱化的情况。若鲁棒水印

嵌入的视频受到外界攻击造成失真, 失真标记视频可描述为 $\tilde{Z} = Z + A_n$, 其中 A_n 为攻击造成的噪声信号; 同时由于可逆嵌入本身的脆弱性, 必须从失真的标记视频中直接提取鲁棒水印 W , 此时施加在过渡视频 Y 上的噪声描述为 $\tilde{Z} - Y = Z - Y + A_n = A_{re} + A_n$, 这里 $A_{re} = Z - Y$ 指可逆嵌入该行为对视频造成失真影响。值得注意的是, 鲁棒水印 W 需要足够鲁棒的嵌入方法才能保证 W 不受外界攻击影响, 此时的鲁棒嵌入方法会对视频产生较大的失真且不可逆影响; 可逆水印 M 用于恢复 W 的嵌入对原始视频 X 产生的不可逆影响, 因此可逆水印需要通过可逆的嵌入方法嵌入中间视频 Y 从而实现原始视频的恢复。但因为鲁棒嵌入发生在可逆嵌入前, 在嵌入域单一的情况下, 直接进行可逆嵌入会对鲁棒水印产生失真影响。

在单一嵌入域的情况下, 噪声 A_n 与 A_{re} 对水印均会产生失真影响, 从而导致鲁棒性弱化的情况。假设这两种噪声信号相互独立, 总噪声表示为

$$\text{Var}(A_{re} + A_n) = \text{Var}(A_{re}) + \text{Var}(A_n) \quad (5)$$

其中, 方差函数 $\text{Var}()$ 用于衡量施加在 W 上的噪

声。VDW框架的噪声分析如图3所示，攻击噪声 A_n 对两个嵌入域均产生了失真影响，即 $(\tilde{Z}^L, \tilde{Z}^H) = 2D - DCT(\tilde{Z}) = 2D - DCT(Z + A_n)$ 。因此，施加在鲁棒水印 W 上的失真噪声为 $A_n^L = \tilde{Z}^L - Z^L$ 。此时，VDW框架允许仅有噪声 A_n^L 施加在 W 上，不受 A_{re} 影响。因此，本文算法中的鲁棒水印失真为 $\text{Var}(A_n^L)$ ，若2D-DWT满足 $\text{Var}(A_n^L) \leq \text{Var}(A_{re}) + \text{Var}(A_n)$ ，则说明VDW框架能够避免两个嵌入域的互相影响，即鲁棒水印不受可逆水印的嵌入影响。在假设标记视频受到攻击的前提下，其中某像素对 $(\tilde{z}_1, \tilde{z}_2) = (z_1 + a_1, z_2 + a_2)$ ， a_1 与 a_2 分别为施加在该像素对上的噪声。最终得到鲁棒嵌入域的对应像素。

$$\tilde{y}^L = \tilde{z}^L = \left\lfloor \frac{z_1 + z_2 + a_1 + a_2}{2} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{z_1 + z_2}{2} \right\rfloor + a^L \quad (6)$$

$$\text{其中}, a^L = \left\lfloor \frac{z_1 + z_2 + a_1 + a_2}{2} \right\rfloor - \left\lfloor \frac{z_1 + z_2}{2} \right\rfloor \approx \frac{a_1 + a_2}{2}.$$

因此，最终施加在鲁棒水印上的失真为

$$\text{Var}(A_n^L) \approx \text{Var}\left(\frac{a_1 + a_2}{2}\right) = \frac{\text{Var}(A_n)}{2} \quad (7)$$

结合式(7)，有 $\text{Var}(A_n^L) \leq \text{Var}(A_{re}) + \text{Var}(A_n)$ ，说明VDW框架在理论上可行，可逆嵌入噪声 A_{re} 不影响鲁棒水印的正常提取。因此，想要恢复原始视频，嵌入域单一的视频水印算法的鲁棒性会不可避免地受双重噪声 A_n 与 A_{re} 降低。

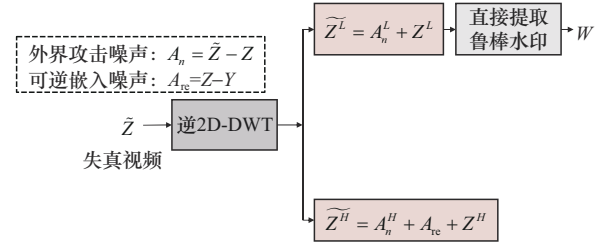


图3 VDW框架的噪声分析

Figure 3 Noise analysis of the VDW framework

2.3 场景平滑度分组机制与隐秘帧选择器机制

基于场景平滑度分组机制设计一种隐秘帧选择器，将帧分组并选择合适帧用于嵌入。帧的差异将决定帧是否被视为同一组或不同组的一部分，如图4所示。以视频Carphone为例，首先将视频拆分为各帧，通过分别计算每一帧中Y通道与U通道的通道值差值，同时计算阈值，进行差值与阈值之间的比较来将视频Foreman根据场景平滑度分组。帧的差异可表示为矩阵差异，即

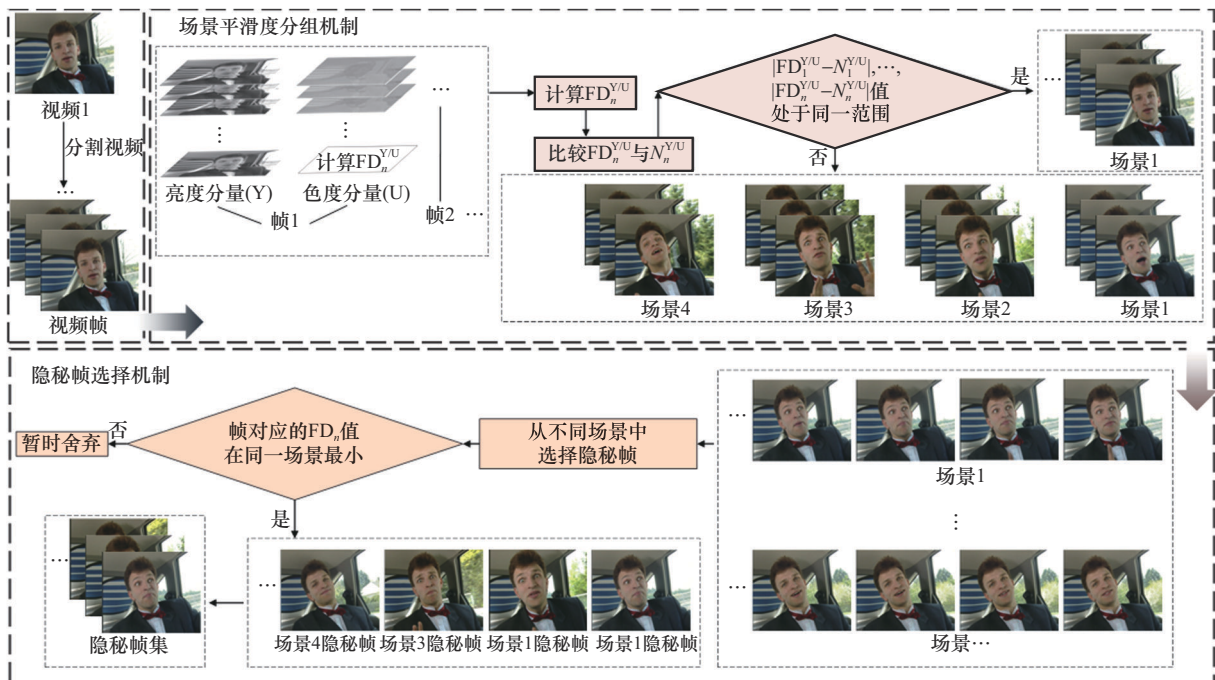


图4 场景平滑度分组机制与隐秘帧选择器

Figure 4 Scene smoothness grouping mechanism and hidden frame selector

$$FD_n^Y = \sum_{l=1}^L |HV_n^Y(l) - HV_n^Y(l+1)| \quad (8)$$

$$FD_n^U = \sum_{l=1}^L |HV_n^U(l) - HV_n^U(l+1)| \quad (9)$$

其中, FD_n^Y 表示第 n 帧的 Y 通道所对应的直方图相邻级之间差值的总和, HV_n^Y 是第 n 帧的 Y 通道的直方图第 L 级对应数值, FD_n^U 表示第 n 帧的 U 通道所对应的直方图相邻级之间差值的总和, HV_n^U 是第 n 帧的 U 通道的直方图第 L 级对应数值, L 为帧对应直方图的总级数。SSGM 对帧的分组基于场景平滑度, 通过设定决策阈值检测双通道的矩阵差异以计算帧纹理的突然转变, 即

$$N_n^Y = \mu_n^Y + \beta_n^Y \sigma_n^Y \quad (10)$$

$$N_n^U = \mu_n^U + \beta_n^U \sigma_n^U \quad (11)$$

其中 N_n^Y 是第 n 帧的 Y 通道阈值, N_n^U 是第 n 帧的 U 通道阈值, μ_n^Y 和 σ_n^Y 是第 n 帧 Y 通道分量的均值与标准差, μ_n^U 和 σ_n^U 是第 n 帧 U 通道分量的均值与标准差, 该机制针对 Y 通道与 U 通道分别选取参数 β 值为 3 与 1.6。帧差异与决策阈值的比较能够反映场景的纹理变化, 同时帧差异本身一定程度上能反映出该帧作为隐秘帧是否合适^[24], 因为帧对应直方图各级之间的差值亦反映了画面纹理的变化程度, 较小的 HD 表明画面纹理变化较少。具有变化更平滑和一致细节的帧有助于更好地隐藏嵌入的水印信息。

帧的分组标准基于 FD 和 N , 具体标准如下: 若从第 n 帧开始同时满足 $FD_n^Y > N_n^Y$ 与 $FD_n^U > N_n^U$, 则包括第 n 帧在内的过往帧作为一个分组, 从第 $n+1$ 帧开始为新分组; 否则第 $n+1$ 帧仍然与第 n 帧作为同一分组。

HFS 选择同一分组中 FD^Y 和 FD^U 二者的和值最小的帧作为水印嵌入的嵌入帧, 即

$$FD_n = FD_n^Y + FD_n^U \quad (12)$$

通过实验发现, 某些视频场景的纹理变化有限, 导致 HFS 输出的隐秘帧数量减少, 嵌入容量不足以容纳水印 W 与 M 。为解决此问题, 算法引入了补偿机制: 当隐秘帧的嵌入容量不足时, 引入子隐秘帧, 以弥补不足。子隐秘帧的选取标准为 FD^Y 和 FD^U 的和值仅次于同组中的首选隐秘帧。

3 本文视频双域水印算法的实现

本节基于 VDW 框架, 提出了双域水印的嵌入与提取, 以及信息完整性认证与最终原始视频的恢复。本文算法的水印嵌入方法合理运用混合 DWT-DCT, 通过对隐秘帧进行 DWT-DCT 获取嵌入域, 将鲁棒水印 W 嵌入 Y 通道低频嵌入域 X^L , 将可逆水印 M 嵌入 Y 通道高频嵌入域 Y^H 。

3.1 鲁棒水印的嵌入

在这一阶段, W 被嵌入 HFS 选择结果的 Y 通道低频嵌入域 X^L 中。

本文算法的嵌入原理如图 5 所示, 以视频 Carphone 为例, Carphone 的隐秘帧集 X , 首先经过 2D-DWT 得到 4 个子带 LL、LH、HL、HH, 对其中的 LL 子带进行 2D-DCT 并抽离亮度分量, 得到嵌入域 X^L 。对 X^L 进行 Zig-Zag 扫描得到系数串 X^L , 并根据 X^L 的长度奇偶性, 将 RS 编码水印串 W' 嵌入 X^L 中。

1) 如果 X^L 的长度为偶数, 即 $2m$, 对 X^L 嵌入 W' , 此时 X^L 变换为

$$Y_i^L = \begin{cases} X_i^L + \alpha \cdot W', 1 \leq i \leq m \\ X_i^L - ((1 - \alpha)W'), m+1 \leq i \leq 2m \end{cases} \quad (17)$$

2) 如果 X^L 的长度为奇数, 即 $2m+1$, 对 X^L 嵌入 W' , 此时 X^L 变换为

$$Y_i^L = \begin{cases} X_i^L + \alpha \cdot W', 1 \leq i \leq m \\ X_i^L - ((1 - \alpha)W'), m+2 \leq i \leq 2m+1 \end{cases} \quad (18)$$

其中, α 为鲁棒控制因子, 控制 W' 的嵌入强度。

值得注意的是, 本文算法在实际应用中存在一种现象: 部分视频场景变换较慢较少, 导致最终 HFS 的选择结果少, 隐秘帧的嵌入容量不足以容纳水印。为解决这个问题, 本文算法提出一种补偿机制: 若隐秘帧的嵌入容量小, 添加次隐秘帧作为嵌入容量的补偿, 选择标准为同一场景内 FD_n 的次最小值。

3.2 可逆水印的嵌入

在可逆嵌入阶段, 用于消除鲁棒嵌入痕迹的可逆水印 M 被嵌入 HFS 选择结果的 Y 通道高频嵌入域 Y^H 中。在解码器端, 根据可逆水印算法的无损特性, 可以无损提取可逆水印, 将嵌入鲁棒水印造成的失真消除, 最终恢复 X^L 。

可逆水印 M 由鲁棒水印嵌入阶段的鲁棒控制因子 α 组成, 用于消除鲁棒水印嵌入阶段造成的失

$$X_i^{L'} = \begin{cases} Y_i^{L'} - M \cdot W', 1 \leq i \leq m \\ Y_i^{L'} + ((1 - M)W'), m + 2 \leq i \leq 2m + 1 \end{cases}$$

$$X_i^{L'} \rightarrow X^L \quad (26)$$

2) 在 Z 被攻击形变为 $\tilde{Z}$ 的情况下, 原始视频的恢复无法成功实现。通过混合 DWT-DCT 直接得到失真的 $\tilde{Z}^L$, 根据式 (23) 直接提取鲁棒水印 W 。只要 α 提供足够健壮的鲁棒性, W 就能被正确提取。

3.4 本文算法步骤

3.4.1 算法嵌入流程

下面给出了算法嵌入流程, 且包含了水印的嵌入与标记视频的形成。

算法嵌入流程

输入 原始视频 X , 鲁棒水印 W

输出 标记视频 Z

(1) 初始化: 原始视频 X , 鲁棒水印 W , 鲁棒控制因子 α , 可逆控制因子 θ^L, θ^R , 视频帧 $n = 1:\text{FrameLength}(X)$, 帧位平面 l , 帧位平面矩阵 HV , 通道阈值 FD_n^Y ;

(2) $RS(W) \rightarrow W'$;

(3) $X \rightarrow n$;

(4) 视频帧分组:

$$1) FD_n^Y = \sum_{l=1}^L |HV_n^Y(l) - HV_n^Y(l+1)|,$$

2) 计算视频帧 n 中亮度分量(Y 通道)的均值与标准差: μ_n^Y, σ_n^Y ,

$$3) N_n^Y = \mu_n^Y + \beta_n^Y \sigma_n^Y,$$

4) 对视频帧 $n, n+1, \dots, n+t$ 再执行步骤 1)~步骤 3), 获得 $FD_n^U, \mu_n^U, \sigma_n^U, N_n^U$,

5) 计算视频帧 $n, n+1, \dots, n+t$ 亮度分量的矩阵差异与阈值之间的差异:

$$\left\{ |FD_n^Y - N_n^Y|, |FD_{n+1}^Y - N_{n+1}^Y|, |FD_{n+2}^Y - N_{n+2}^Y|, \dots, |FD_{n+t}^Y - N_{n+t}^Y| \right\};$$

6) 对视频帧 $n, n+1, \dots, n+t$ 的色度分量 (U 通道) 再执行步骤 1)~步骤 5), 获得

$$FD_n^U, \mu_n^U, \sigma_n^U, N_n^U, \left\{ |FD_n^U - N_n^U|, |FD_{n+1}^U - N_{n+1}^U|, |FD_{n+2}^U - N_{n+2}^U|, \dots, |FD_{n+t}^U - N_{n+t}^U| \right\}$$

7) 决策帧分组;

8) 更新阈值 N_{n+t}^Y 与 N_{n+t}^U , 对 X 剩余视频帧再执行步骤 (4);

(5) 选择隐秘帧:

1) 选择同一帧分组内 FD_n 最小的视频帧:

$$FD_n = FD_n^Y + FD_n^U;$$

2) 组内剩余帧暂时舍弃;

3) 隐秘帧位置信息 $\rightarrow P$;

(6) 2D - DWT(隐秘帧) $\rightarrow LL, LH, HL, HH$;

(7) 鲁棒嵌入阶段:

1) 2D - DCT(LL) $\rightarrow X^L$;

2) Zig - Zag(X^L) $\rightarrow X^{L'}$,

3) Length($X^{L'}$) $\rightarrow C$,

4) 如果 C 是偶数, 即 $C = 2m$,

$$Y_i^L = \begin{cases} X_i^{L'} + \alpha \cdot W', 1 \leq i \leq m \\ X_i^{L'} - ((1 - \alpha)W'), m + 1 \leq i \leq 2m \end{cases}$$

5) 如果 C 是奇数, 即 $C = 2m + 1$,

$$Y_i^L = \begin{cases} X_i^{L'} + \alpha \cdot W', 1 \leq i \leq m \\ X_i^{L'} - ((1 - \alpha)W'), m + 2 \leq i \leq 2m + 1 \end{cases}$$

6) $Y^H = X^H$,

(8) 可逆嵌入阶段:

1) 2D - DCT(HH) $\rightarrow Y^H$,

2) Zig - Zag(Y^H) $\rightarrow Y^{H'}$,

3) $M = \alpha$,

4) $RS(M) \rightarrow M'$,

$$5) Z^H = \begin{cases} 2Y^{H'} + M', Y^{H'} \in [\theta^L, \theta^R] \\ Y^{H'} + \theta^R + 1, Y^{H'} > \theta^R \\ Y^{H'} + \theta^L, Y^{H'} < \theta^L \end{cases}$$

6) $Z^L = Y^L$,

(9) 逆 2D - DCT(Z^L) $\rightarrow LL'$;

(10) 逆 2D - DCT(Z^H) $\rightarrow HH'$;

(11) 逆 2D - DCT(LL', HH', HL, LH) $\rightarrow$ 标记帧;

(12) 标记帧+舍弃帧 $\rightarrow$ 标记视频。

3.4.2 算法提取与载体恢复流程

下面给出了算法提取与载体恢复流程, 且包含了水印的提取与原始视频的恢复。

算法提取与载体恢复流程

输入 标记视频 Z , 隐秘帧位置信息 P

输出 如果标记视频 Z 未受到外界攻击, 则输出鲁棒水印 W 与原始视频 X ;

如果标记视频 Z 受到外界攻击，则仅输出鲁棒水印 W

(1) 初始化：标记视频 Z ，原始视频 X ，隐秘帧位置信息 P ，可逆控制因子 θ^L ， θ^R ；

(2) 隐秘帧位置信息 $P \rightarrow$ 隐秘帧；

(3) $2D - DWT$ （隐秘帧） $\rightarrow LL', HH', LH, HL$ ；

(4) $2D - DCT(LL') \rightarrow Z^L$ ；

(5) $2D - DCT(HH') \rightarrow Z^H$ ；

(6) 如果标记视频 Z 未受到外界攻击，则

1) 可逆提取与恢复阶段

$$\textcircled{1} M = \text{mod}\left(\frac{Z^H}{2}\right), Z^H \in [2\theta^L, 2\theta^R + 1],$$

$$\textcircled{2} M = \text{de}_{\text{RS}(M')},$$

$$\textcircled{3} Y^H = \begin{cases} \left\lfloor \frac{Z^H - M}{2} \right\rfloor, Z^H \in [2\theta^L, 2\theta^R + 1] \\ Z^H - \theta^R - 1, Z^H > 2\theta^R + 1 \\ Z^H - \theta^L, Z^H < 2\theta^L \end{cases},$$

$$\textcircled{4} Y^L = Z^L;$$

2) 鲁棒提取阶段

$$\textcircled{1} \text{Zig} - \text{Zag}(Y^L) \rightarrow Y^{L'},$$

$$\textcircled{2} \text{Length}(Y^{L'}) \rightarrow C,$$

③ 如果 C 是偶数，即 $C = 2m$ ，

$$W' = \frac{\sum_{i=1}^m Y_i^{L'} - \sum_{i=m+1}^{2m} Y_i^{L'}}{m},$$

④ 如果 C 是奇数，即 $C = 2m + 1$ ，

$$W' = \frac{\sum_{i=1}^m Y_i^{L'} - \sum_{i=m+2}^{2m+1} Y_i^{L'}}{m},$$

$$\textcircled{5} W = \text{de}_{\text{RS}(W')},$$

$$\textcircled{6} X^L = Y^L \oplus M,$$

$$\textcircled{7} X^H = Y^H,$$

逆 $2D - DCT(X^L) \rightarrow LL$,

逆 $2D - DCT(X^H) \rightarrow HH$,

逆 $2D - DCT(LL, HH, LH, HL) \rightarrow$ 原始帧，

原始帧+舍弃帧 $\rightarrow$ 原始视频；

(7) 如果标记视频 Z 受到外界攻击：直接执行下一步，即舍弃其余步骤。

4 仿真实验与结果

本节通过与3种视频水印算法^[12,24-25]在不可见性与鲁棒性方面进行比较来评估本文算法性能。其中文献[12]算法基于H.264视频编码，文献[24]与文献[25]算法面向的水印类型是图像，在本文实验中将水印比特串按照ZSig-Zag扫描顺序转换为灰度图像，将灰度图像作为文献[24-25]算法的水印输入。3种视频水印算法均为挑选合适帧或块作为水印嵌入位置的算法。

本次实验基于Matlab R2021a平台，i5处理器模拟仿真。嵌入容量测试选择水印 W 序列为256位，实验视频使用了3段分辨率为 176×144 的MP4视频（Carphone, Foreman, Mobile）以及3段分辨率为 352×288 的MP4视频（Blue Sky, Park Joy, Ducks Take Off）。实验中均取两种分辨率视频的前150帧作为实验帧。

4.1 不可见性分析

4.1.1 主观分析层面

主观分析，通过人体肉眼对水印嵌入前后的实验视频进行分析。图6与图7分别给出分辨率为 176×144 与 352×288 的MP4视频在嵌入前后的隐秘帧对比。通过视觉对比，说明在主观层面上无法明确判断隐秘帧是否嵌入水印。



(a) 分辨率为 176×144 的MP4视频在嵌入前的隐秘帧



(b) 分辨率为 176×144 的MP4视频在嵌入后的隐秘帧

图6 分辨率为 176×144 的MP4视频在嵌入前后的隐秘帧对比
Figure 6 Hidden frame comparison of MP4 video with resolution of 176×144 before and after embedding

4.1.2 客观分析层面

客观分析是通过在原始视频帧与水印视频帧之间计算平均峰值信噪比（MPSNR）与平均结构相似度（MSSIM），对本文算法进行评估。

$$\text{MPSNR}(F, F') = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^F \text{PSNR}_j \quad (27)$$



图7 分辨率为352×288的MP4视频在嵌入前后的隐秘帧对比

Figure 7 Hidden frame comparison of MP4 video with resolution of 352×288 before and after embedding.

$$MSSIM(F, F') = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N SSIM_j \quad (28)$$

其中, F 为隐秘帧, F' 为嵌入的隐秘帧, N 为隐秘

帧总数。图8与图9分别给出分辨率为176×144与352×288的MP4视频嵌入水印后的前150帧与原始的前150帧之间的PSNR与SSIM。表1为本文算法

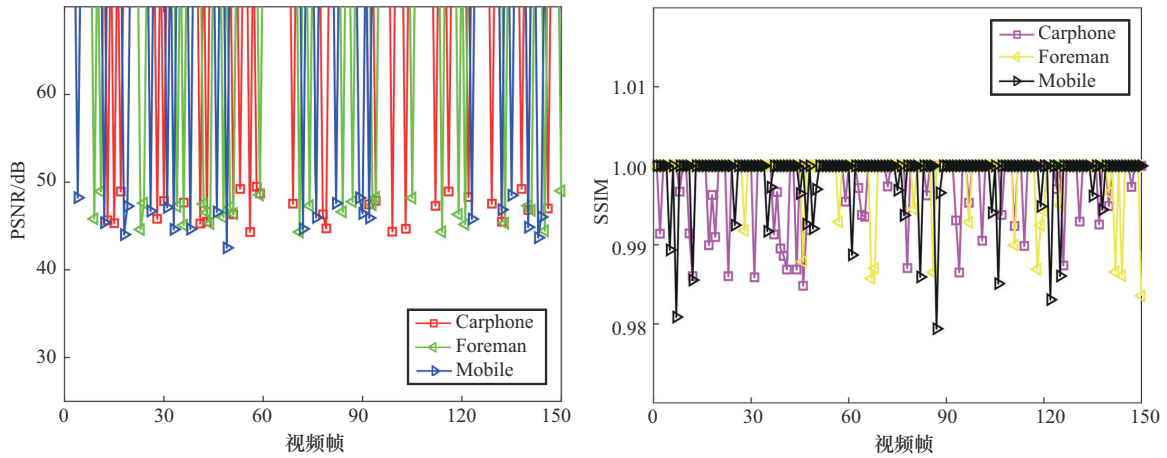


图8 分辨率为176×144的MP4视频嵌入水印后的前150帧与原始的前150帧之间的PSNR与SSIM

Figure 8 PSNR and SSIM of watermarked vs. original video frames (176×144, first 150 frames)

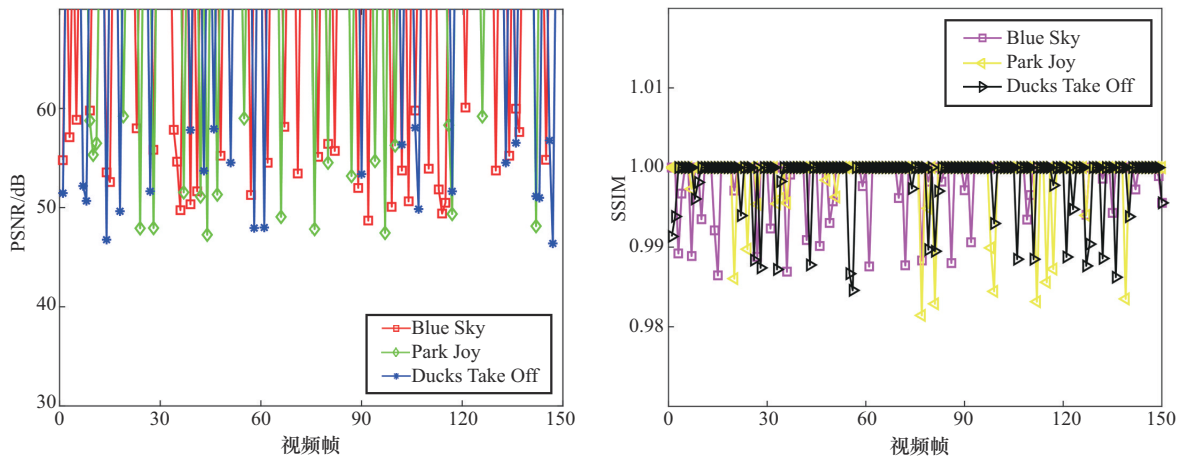


图9 分辨率为352×288的MP4视频嵌入水印后的前150帧与原始的前150帧之间的PSNR与SSIM

Figure 9 PSNR and SSIM of watermarked vs. original video frames (352×288, first 150 frames)

表1 本文算法与3种对比算法的MPSNR与MSSIM

Table 1 MPSNR and MSSIM between the proposed algorithm and three comparison algorithms

实验视频	文献[12]算法		文献[24]算法		文献[25]算法		本文算法	
	MPSNR	MSSIM	MPSNR	MSSIM	MPSNR	MSSIM	MPSNR	MSSIM
Carphone	46.631 9	0.977 3	48.197 2	0.979 6	48.261 8	0.979 7	48.917 7	0.983 8
Foreman	45.551 1	0.973 2	48.011 7	0.976 3	48.116 7	0.978 4	48.622 5	0.981 1
Mobile	43.466 1	0.968 1	44.991 3	0.969 1	45.889 2	0.969 8	45.982 4	0.976 9
Blue Sky	47.745 9	0.979 6	48.435 7	0.980 7	48.681 3	0.982 8	51.503 6	0.992 2
Park Joy	46.883 7	0.976 5	48.001 3	0.979 3	48.084 7	0.981 0	49.908 2	0.988 4
Ducks Take Off	46.008 4	0.972 9	47.278 7	0.976 9	47.631 8	0.978 9	49.120 6	0.981 5

与3种对比算法的MPSNR与MSSIM, 基于嵌入 W 和 M 后两种视频的前150帧。

通过图8~图9与表1的数据显示, 分辨率为 176×144 与 352×288 的MP4视频在本文算法下, 嵌入 W 和 M 后的MPSNR分别为48.917 7dB, 48.622 5dB, 45.982 4dB, 51.503 6dB, 49.908 2dB, 49.120 6dB; MSSIM分别为0.983 8, 0.981 1, 0.976 9, 0.992 2, 0.988 4, 0.981 5。这些数据说明本文算法在嵌入前后对视频的影响更小。值得注意的是, 本文算法是面向H.264视频编码标准的水印算法。从实验数据中可观察到, MP4格式的实验视频中未被选择为隐秘帧的视频帧, 其PSNR值无限大, SSIM值均为1, 说明本文算法的嵌入过程相对独立, 隐秘帧的嵌入不对其他帧产生影响。隐秘帧在嵌入信息后最低的PSNR不

小于42.257 4 dB, 最低的SSIM不小于0.979 1。综上所述, 本文算法的不可见性较好。

考虑到PSNR对不可见性分析的局限性, 本文做了额外的实验, 来计算本文算法在比特率扩张上的表现。

比特率扩张指在嵌入信息后视频文件扩张的大小。表2展示了本文算法与3种对比算法的比特率扩张、水印嵌入量与视频增量比值的对比。水印嵌入量是 $W + M$ 的总信息量。综合图8~图9与表2的比较, 本文算法在对视频本身的影响上更小, 不可见性更好。

4.2 鲁棒性分析

本节对本文算法与文献[12,24-25]算法在不同种类及强度的视频攻击下进行了鲁棒性分析实验。对嵌入水印后的实验视频分别进行了以下攻击:

表2 本文算法与3种对比算法的比特率扩张、水印嵌入量与视频增量比值的对比

Table 2 bit-rate expansion, watermark embedding and video increment ratio between the proposed algorithm and three comparison algorithms

实验视频	文献[12]算法		文献[24]算法		文献[25]算法		本文算法	
	比特率扩张	水印嵌入量 与视频增量 的比值	比特率扩张	水印嵌入量 与视频增量 的比值	比特率扩张	水印嵌入量 与视频增量 的比值	比特率扩张	水印嵌入量 与视频增量 的比值
Carphone	8.89%	1.21	8.66%	1.21	8.46%	1.23	8.35%	1.24
Foreman	12.61%	1.14	12.41%	1.15	12.33%	1.15	11.84%	1.16
Mobile	15.37%	1.04	15.12%	1.05	14.67%	1.09	13.90%	1.11
Blue Sky	8.17%	1.24	7.83%	1.25	7.47%	1.27	7.09%	1.29
Park Joy	11.47%	1.18	11.28%	1.19	11.09%	1.19	10.27%	1.20
Ducks Take Off	11.89%	1.15	11.64%	1.17	11.38%	1.18	11.15%	1.19

均值为0, 方差分别为0.01、0.05、0.1的高斯噪声攻击; 均值为0, 方差分别为0.01、0.05、0.1的椒盐噪声攻击; 滤波器维数为3×3, 方差为0.1、0.2、0.3的高斯低通滤波攻击(模糊攻击); 帧丢失攻击(随机丢失10%~30%视频帧); 帧平均攻击(随机平均10%~30%视频帧); 帧交换攻击(随机交换10%~35%视频帧); H.264视频编码的重压缩攻击(量化因子QP=26~28, 剩余压缩参数设置固定, 其中码率=1 Mbit/s, 帧率=30 frame/s, 画面组GOP=60帧)。然后分别从受攻击视频的隐秘帧中提取水印, 通过计算提取水印(何种压缩算法进行攻击) W^* 与原始水印 W 之间的平均归一化互相关系数(MNC)、平均误码率(MBER)并进行比较, 以此对本文提出的算法鲁棒性进行评估。MNC与MBER的计算式为

$$MNC = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^F \frac{\sum \left[(W - \mu_W)(W^* - \mu_{W^*}) \right]}{\sigma_{\mu_W} \sigma_{\mu_{W^*}}} \quad (29)$$

$$MBER = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^F \frac{L_E}{L_W} \quad (30)$$

其中, W 和 W^* 分别是原始水印与提取水印, μ_W 与 μ_{W^*} 分别是原始水印与提取水印的平均值, σ_{μ_W} 与 $\sigma_{\mu_{W^*}}$ 分别为原始水印与提取水印的标准差, MNC的取值范围是[-1,1], L_E 与 L_W 分别为错误水印比特数与原始水印比特数, N 为隐秘帧总数, F 为隐秘帧。

4.2.1 本文算法的鲁棒性分析

图10~图16分别为本文算法与3种视频水印算法在面对高斯噪声攻击、椒盐噪声攻击、模糊攻击、帧丢失攻击、帧平均攻击、帧交换攻击、重压缩攻击下的MNC值与MBER值。图中的 x 值是不同攻击强度下的MNC值, y 值是不同攻击强度下的MBER值, 每个点从左向右遭受的攻击强度递减并且嵌入强度相同。从图10~图16中可以看出, 本文算法总体上对各种噪声失真攻击的效果更好, 同时场景更为平稳的176×144分辨率的MP4视频Carphone、Foreman与352×288分辨率的MP4视频Blue Sky在本文算法下, 抵抗噪声失真攻击与帧攻击的效果会更好, MNC值降幅较小, MBER值升幅较小。

本文算法在面对噪声失真攻击时具有更好的鲁棒性, 原因主要有两个: 首先, 通过在频域上再做频域变换并嵌入 W , 相比直接在帧像素或经过单次频域变换的频域上嵌入具有更强的鲁棒性; 其次, 通过鲁棒控制因子的嵌入策略, 能够平衡视频质量与嵌入强度, 对噪声失真攻击具有更强的鲁棒性。实验视频在面对高斯噪声与椒盐噪声时, MNC值均大于0.993 3, MBER值均大于0.058 2; 在面对模糊攻击时MNC值最高达到了1, MBER值均小于0.001, 鲁棒性最好。模糊攻击会对实验视频帧的像素值分区域修改, 但像素值在经过混合DWT-DCT后转换为频域, 频域上的修改对压缩后的空域像素值影响较小, 仍能正确提取水印。

实验视频在面对帧攻击时, 文献[12,24-25]的算法与本文算法的鲁棒性均比面对失真噪声攻击的鲁棒性强, 原因在于每种算法均是寻找视频内最合适的帧进行嵌入的, 对于帧攻击均具有较好的鲁棒性。其中, 本文算法在面对帧平均攻击时表现最好, MNC值均大于0.999 5, MBER值均小于0.001 6, 显现出较强的鲁棒性。帧平均攻击会将抽取的一批连续帧的像素进行平均值处理, 但水印受到的影响仍然较小, 原因在于平均值处理造成的错误在纠错码的纠错范围之内。

本文算法在帧丢失攻击的强度上升时, MNC值与MBER值出现较为明显的弱化趋势, 其中176×144分辨率的MP4视频Mobile与352×288分辨率的MP4视频Ducks Take Off的数值弱化幅度较其他视频大, 原因在于这两个视频的场景变换快, 画面平滑度也低, 导致各组隐秘帧之间的间距小。在抽帧数量持续增加的前提下, 标记水印所在的隐秘帧被攻击的概率增大, 导致标记帧丢失的概率增大, 在后续提取水印时会导致错位。即使帧丢失攻击造成的错误仍在纠错范围内, 但错位会在一定程度上影响提取精度, 导致数值弱化。但即使如此, 最低MNC值仍在0.998 5以上, 最高MBER值仍在0.005 5以下。

本文算法在面对不同强度的帧交换攻击时, 同样出现弱化趋势, 但对应的趋势降幅较帧丢失攻击小, 这是因为帧丢失攻击会导致视频隐秘帧

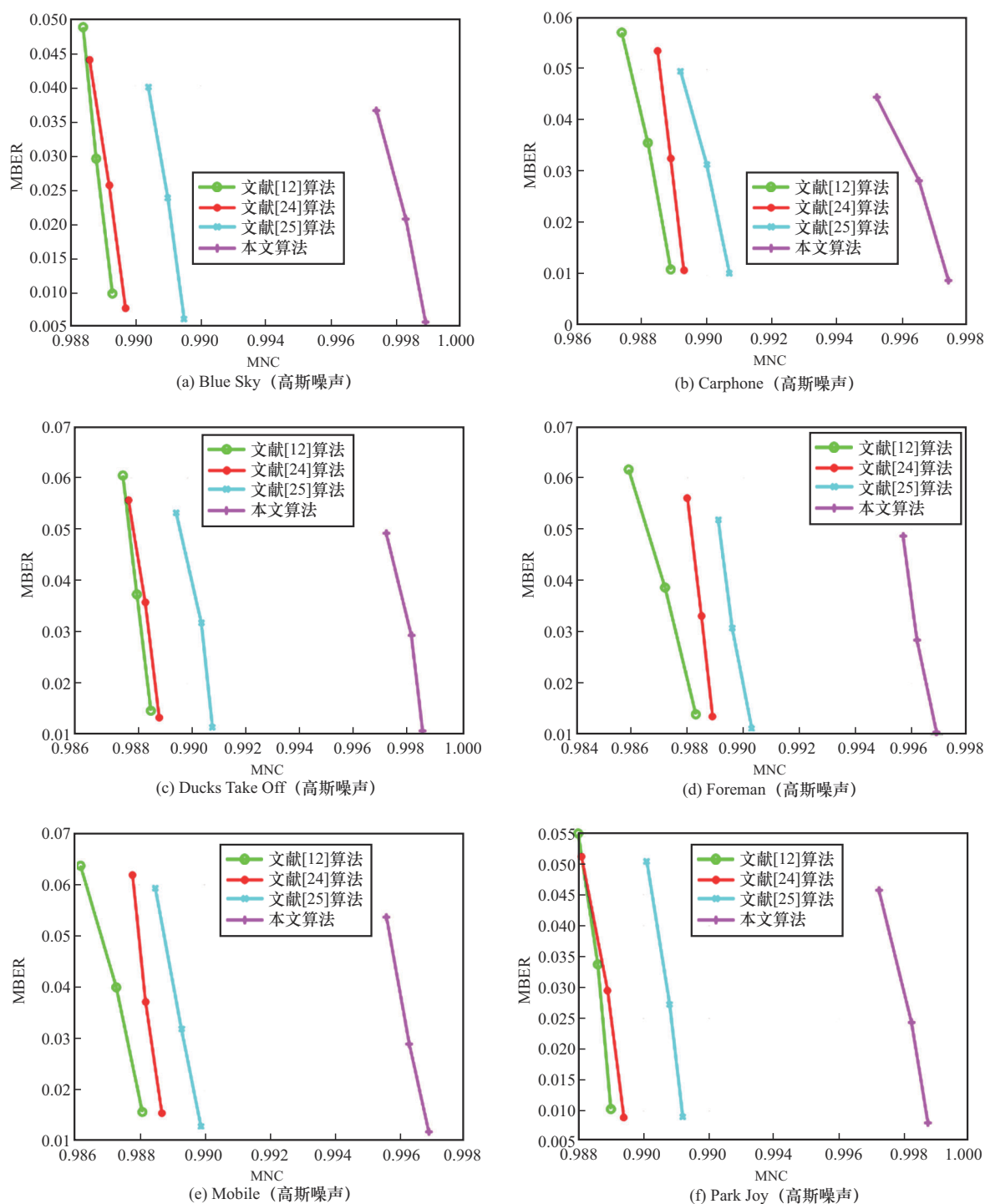


图10 本文算法与3种对比算法在面对高斯噪声攻击下的MNC与MBER

Figure 10 The proposed algorithm compares with three algorithms in the face of Gaussian noise attack on MNC and MBER

丢失，若其中一个隐秘帧丢失，后续帧都会向前移位，而隐秘帧存在前后的嵌入顺序。随着攻击强度的上升，丢失一批包含隐秘帧的连续帧会导致后续隐秘帧顺序错位，最终导致水印提取的错误。在面对帧交换攻击时，随着交换强度的上

升，视频帧的总量仍能够在一定程度上降低隐秘帧被交换的概率。因此，本文算法在面对帧交换攻击时的鲁棒性强于面对帧丢失攻击时的鲁棒性，MNC值均大于0.998 9，MBER值均大于0.004 1。

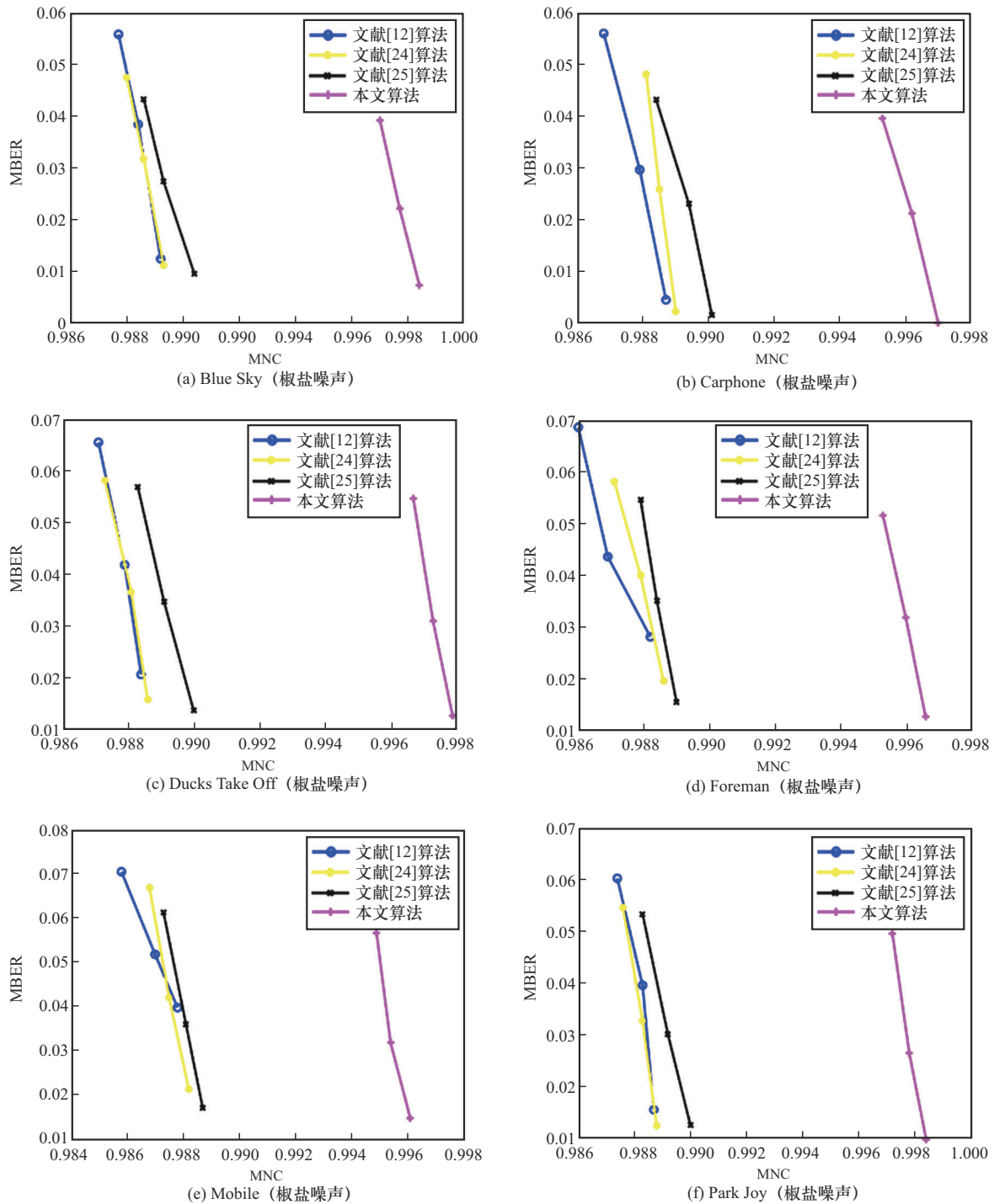


图 11 本文算法与 3 种对比算法在面椒盐噪声攻击下的 MNC 与 MBER

Figure 11 The proposed algorithm compares with three algorithms in the face of salt-and-pepper noise attack on MNC and MBER

实验视频在面对不同 QP 的重编码攻击时, 显现出较好的鲁棒性, 原因在于本文算法的鲁棒嵌入是 LL 子带上再进行 2D-DCT 的鲁棒嵌入, 抗重压缩的鲁棒性强。其中, 原始 QP 为 26, 重编码对视频质量的影响小于 QP 为 28 的重编码影

响, 因为越大的量化因子会损失越多的细节信息, 造成更多失真。最终, MNC 值大于 0.999 4, MBER 值小于 0.001 8。

4.2.2 算法鲁棒性的对比分析

本节将本文算法与文献[12, 24-25]中的 3 种

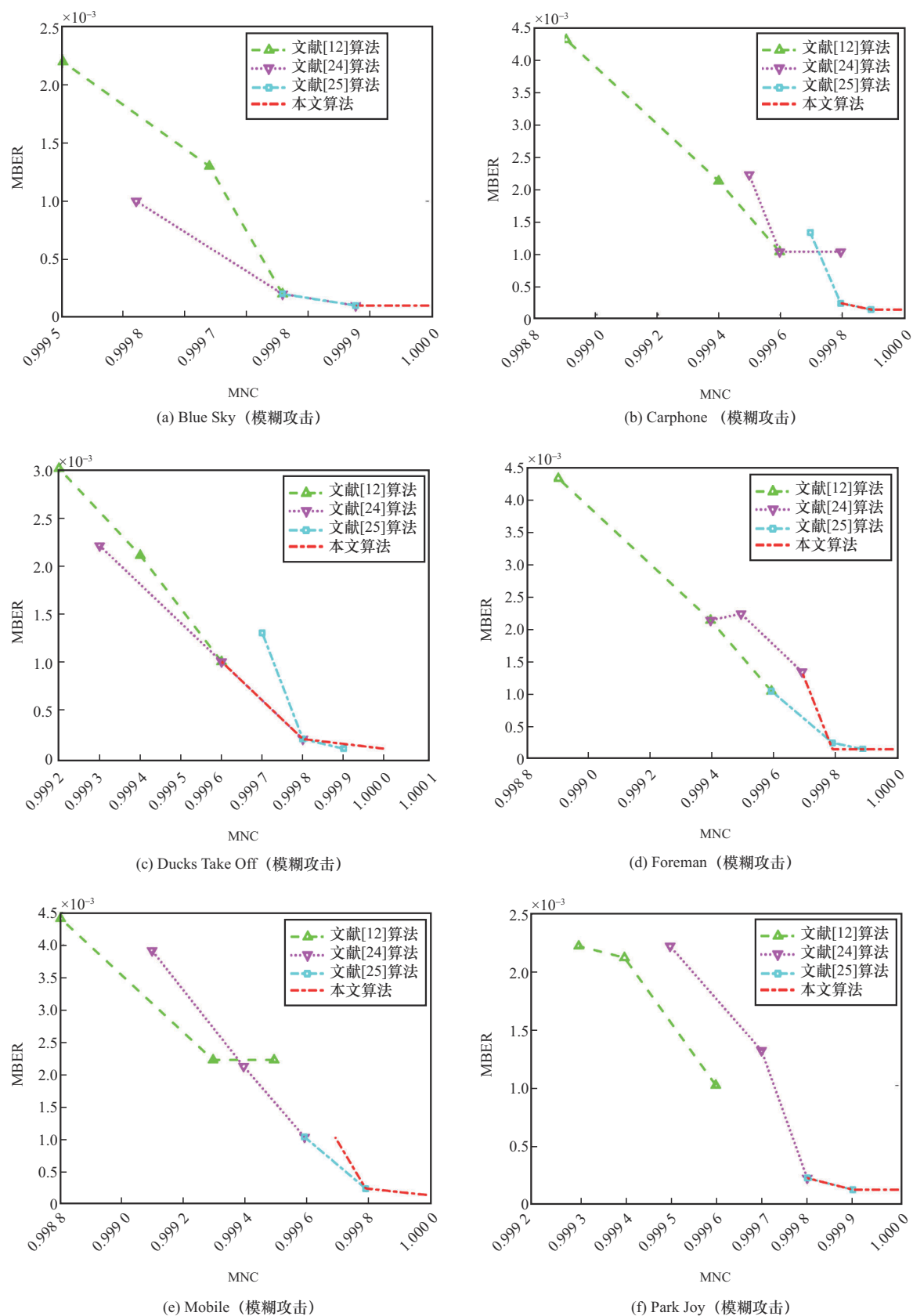


图12 本文算法与3种对比算法在面临模糊攻击下的MNC与MBER

Figure 12 The proposed algorithm compares with three algorithms in the face of fuzzy attack on MNC and MBER

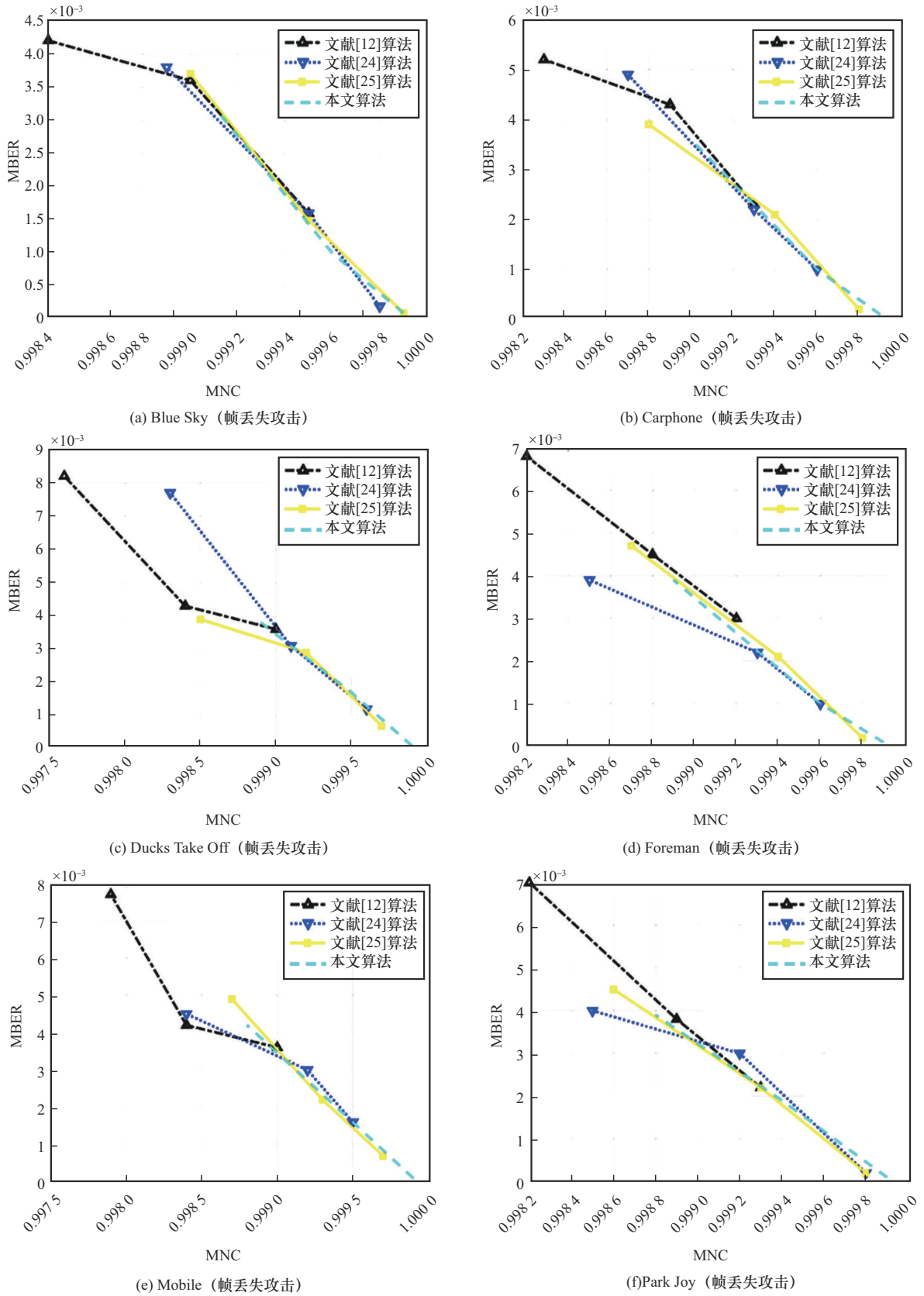
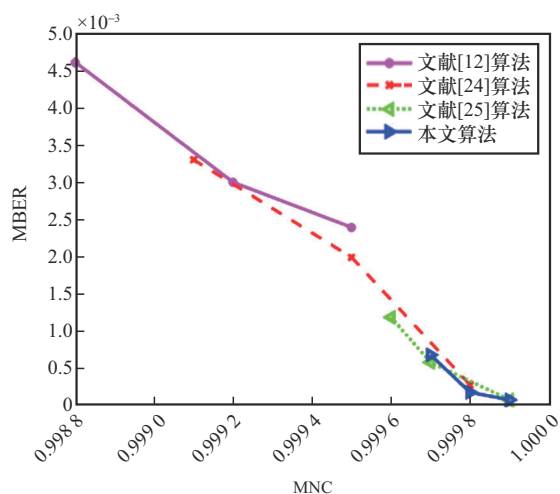
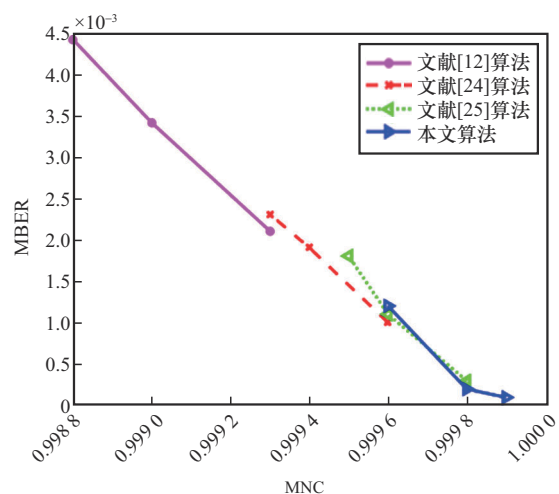


图 13 本文算法与 3 种对比算法在面对帧丢失攻击下的 MNC 与 MBER

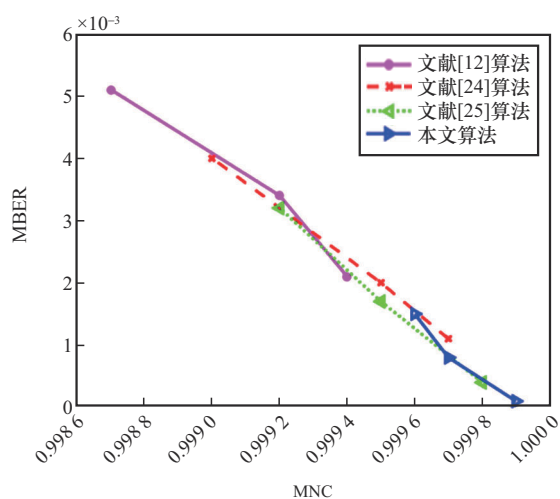
Figure 13 The proposed algorithm compares with three algorithms in the face of frame loss attack on MNC and MBER



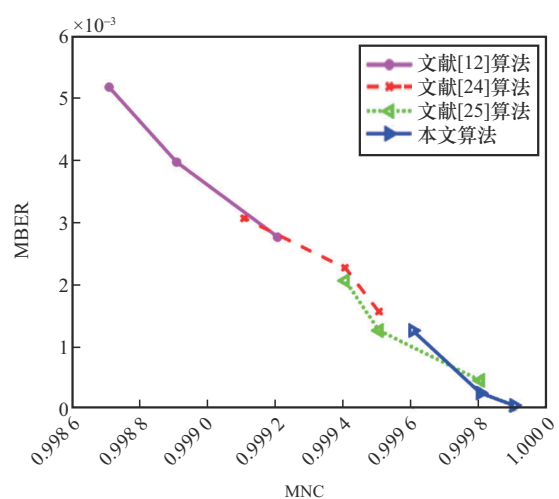
(a) Blue Sky (帧平均攻击)



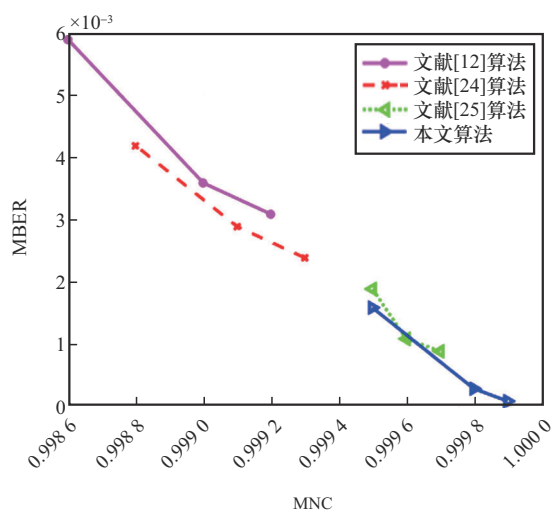
(b) Carphone (帧平均攻击)



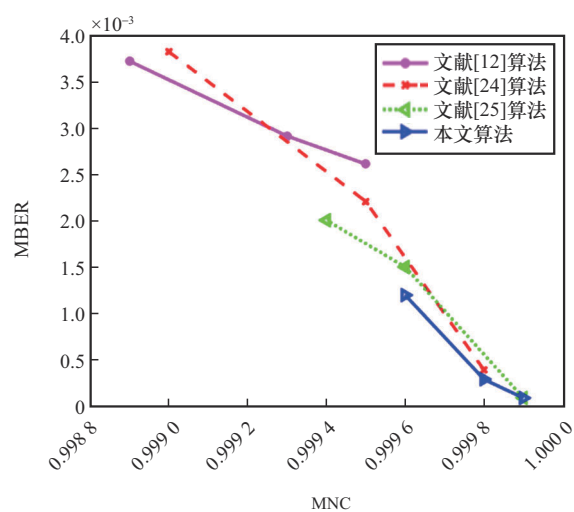
(c) Ducks Take Off (帧平均攻击)



(d) Foreman (帧平均攻击)



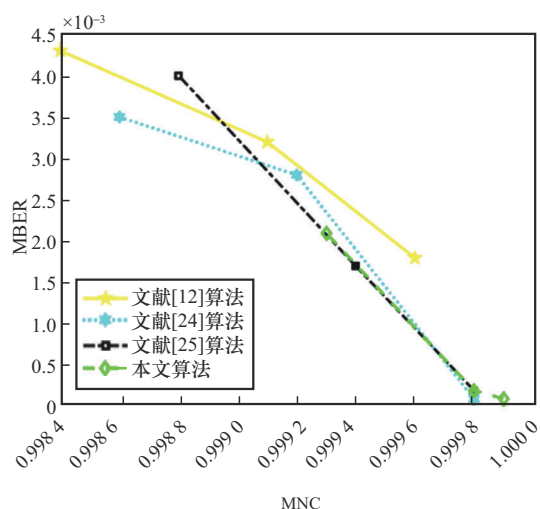
(e) Mobile (帧平均攻击)



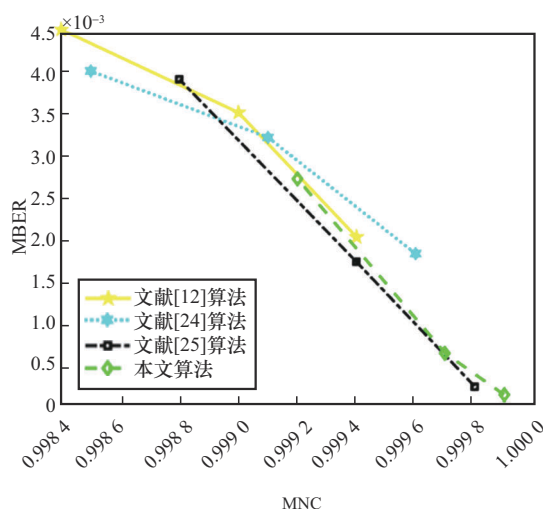
(f) Park Joy (帧平均攻击)

图14 本文算法与3种对比算法在面对帧平均攻击下的MNC与MBER

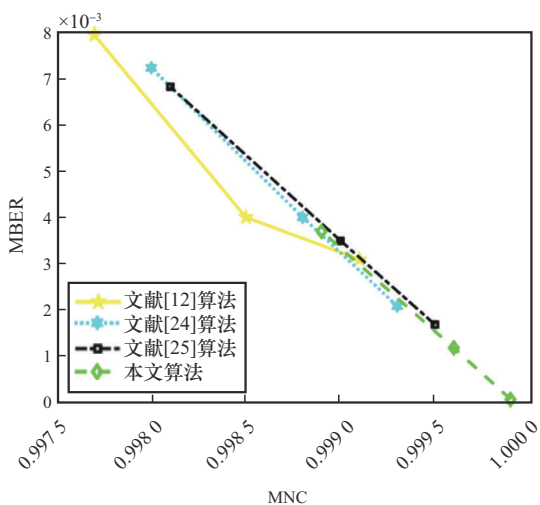
Figure 14 The proposed algorithm compares with three algorithms in the face of frame average attack on MNC and MBER



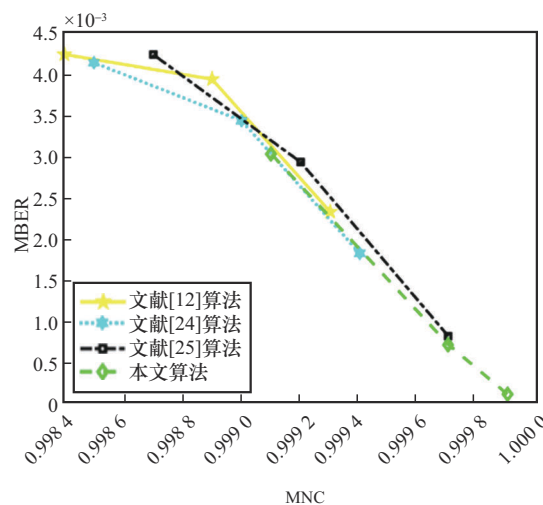
(a) Blue Sky (帧交换攻击)



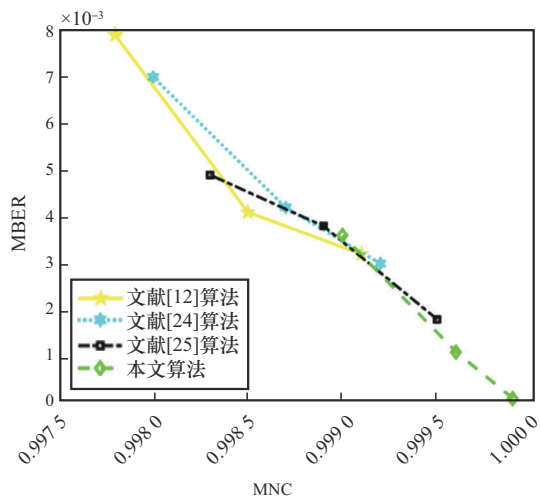
(b) Carphone (帧交换攻击)



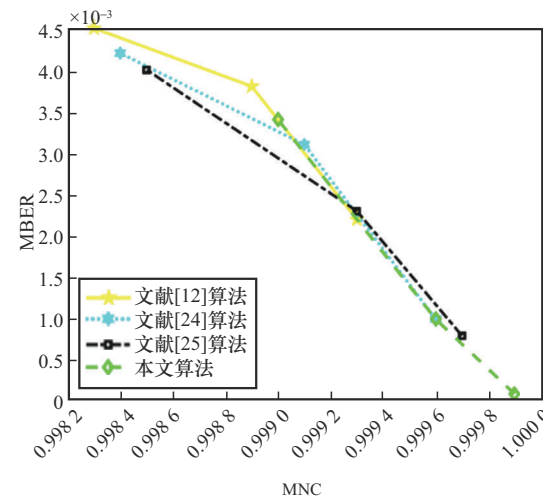
(c) Ducks Take Off (帧交换攻击)



(d) Foreman (帧交换攻击)



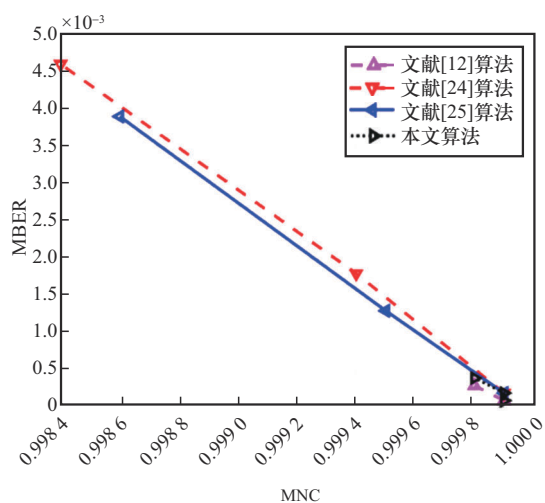
(e) Mobile (帧交换攻击)



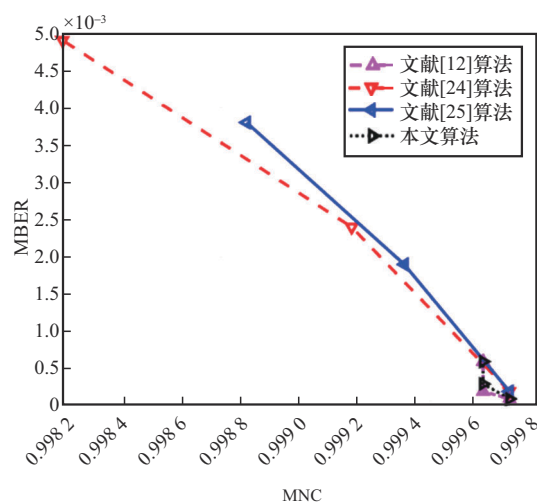
(f) Park Joy (帧交换攻击)

图 15 本文算法与 3 种对比算法在面临帧交换攻击下的 MNC 与 MBER

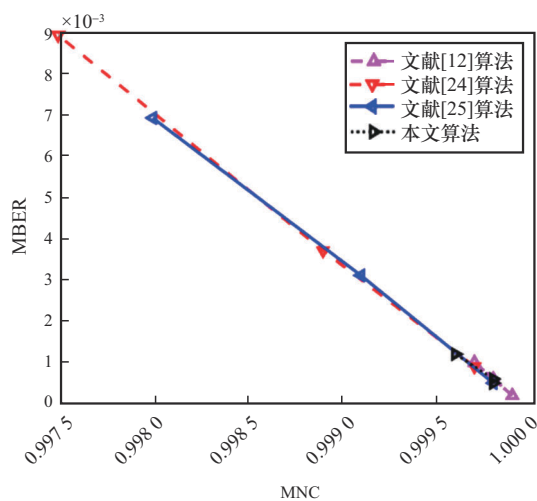
Figure 15 The proposed algorithm compares with three algorithms in the face of frame switching attack on MNC and MBER



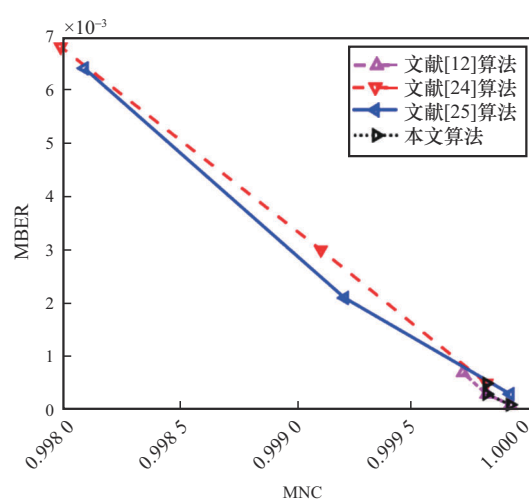
(a) Blue Sky (重压缩攻击)



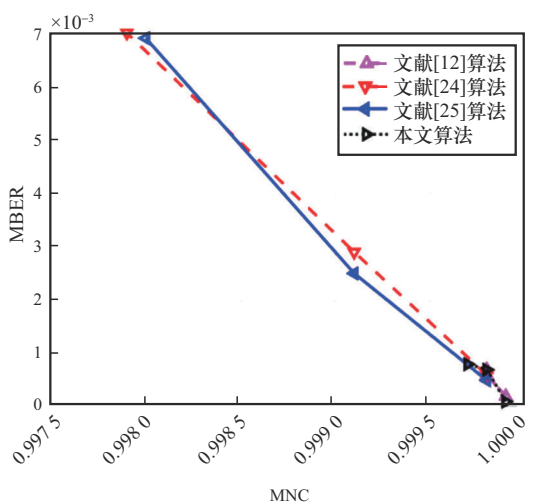
(b) Carphone (重压缩攻击)



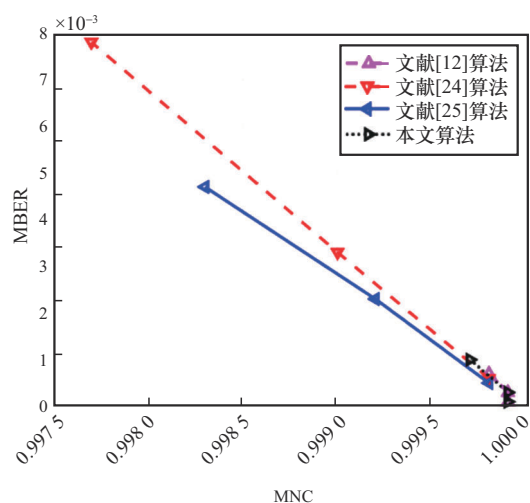
(c) Ducks Take Off (重压缩攻击)



(d) Foreman (重压缩攻击)



(e) Mobile (重压缩攻击)



(f) Park Joy (重压缩攻击)

图16 本文算法与3种对比算法在面对重压缩攻击下的MNC与MBER

Figure 16 The proposed algorithm compares with three algorithms in the face of recompression attack on MNC and MBER

视频水印算法进行了对比实验。实验中攻击强度的参数与本文算法的鲁棒性分析实验设置一致。从图 10~图 16 中可以看出, 在相同的攻击与强度下, 本文算法在鲁棒性上总体优于对比算法。文献[12]算法在鲁棒性对比分析的各种攻击中, 抵抗重压缩攻击的鲁棒性性能与本文算法相近, 原因在于选择用于水印嵌入的子块后, 通过视频以及水印的特征来确定水印的嵌入方式, 实现强鲁棒与不可见的视频水印。但本文算法与文献[12]算法不同之处在于, 文献[12]算法根据色度选择子块并进行调制, 而本文算法根据亮度与色度的矩阵差异进行帧的场景平滑度检测并分组, 最终选择同一组内亮度与色度矩阵差异值最小的帧进行嵌入, 实现了更为鲁棒的视频水印。

4.3 复杂度分析

考虑到本文算法在实际应用中的效率, 本节分析了算法的计算复杂度。在复杂度分析实验中, 测量了嵌入水印前后实验视频的编解码所需时间, 并计算了单位帧下的编解码所需时间。原始视频与标记视频的编解码时间及差值见表 3。其中, 实验视频 Carphone、Foreman、Mobile 的分辨率为 176×144 , 实验视频 Blue Sky、Park Joy、Ducks Take Off 的分辨率为 352×288 。嵌入水印前后的单位帧编码的时间差较小, 均在

0.033 s 内; 解码时间差不大于 0.025 s, 复杂度较低。

5 结束语

本文提出了一种基于混合 DWT-DCT 和帧分组的视频双域水印算法, 该算法对鲁棒水印与可逆水印进行了预处理, 通过场景平滑度对视频帧进行分组并选择用于嵌入的隐秘帧, 分别嵌入经混合 DWT-DCT 处理后的隐秘帧, 实现了水印的鲁棒可逆嵌入。具体而言, 该算法通过在低频和高频两个独立嵌入域中分别嵌入, 可以在第一阶段提供较强的鲁棒性, 在第二阶段保持较低的失真。本文算法在赋予水印良好的纠错能力的同时, 规避可逆嵌入对水印鲁棒性的影响, 并在无攻击的情况下实现无损恢复视频; 即使受到攻击, 也能够正常提取出水印, 实现了鲁棒性与可逆性的兼顾。实验结果表明, 本文算法比几种先进的基于关键帧嵌入的视频水印算法具有更好的性能, 能够满足实际应用中的需求, 实现了对视频版权的保护。

本文算法最大的优点是提出了视频双域水印框架, 基于场景平滑度进行分组, 实现不同分辨率视频的高保真。此外, 本文算法计算复杂度较低, 可方便快捷地应用于已有视频。在未来的工作中, 将尝试设计更合理的帧分组与选择嵌入的机制, 以提供更强的鲁棒性。

表 3 原始视频与标记视频的编解码时间及差值

Table 3 The encoding time, decoding time and the difference between the original video and the watermarked video

实验视频	原始视频单位帧 编码时间/s	水印视频单位帧 编码时间/s	差值	原始视频单位帧 解码时间/s	水印视频单位帧 解码时间/s	差值
Carphone (176×144)	0.918	0.938	0.020	0.329	0.334	0.005
Foreman (176×144)	0.928	0.946	0.018	0.344	0.348	0.004
Mobile (176×144)	0.949	0.964	0.015	0.373	0.383	0.010
Blue Sky (352×288)	1.590	1.623	0.033	0.771	0.788	0.017
Park Joy (352×288)	1.605	1.635	0.030	0.790	0.815	0.025
Ducks Take Off (352×288)	1.626	1.656	0.030	0.818	0.840	0.022

参考文献:

- [1] 张雄伟, 葛晓义, 孙蒙, 等. 音频隐写方法综述: 从传统到深度学习[J]. 数据采集与处理, 2023, 38(5): 995-1016.
- ZHANG X W, GE X Y, SUN M, et al. An overview of audio steganography methods: from tradition to deep learning [J]. Journal of Data Acquisition & Processing. 2023, 38(5): 995-1016.
- [2] 王艺龙, 李震宇, 巩道福, 等. 基于块邻域的图像双脆弱水印算法[J]. 网络与信息安全学报, 2023, 9(3): 38-48.
- WANG Y L, LI Z Y, GONG F, et al. Image double fragile watermarking algorithm based on block neighborhood [J]. Chinese Journal of Network and Information Security. 2023, 9(3): 38-48.
- [3] MA B, LI K, XU J, et al. Enhancing the security of image steganography via multiple adversarial networks and channel attention modules[J]. Digital Signal Processing. 2023, 141: 104121.
- [4] GUAN Q, CHEN K, CHEN H, et al. Detecting steganography in JPEG images recompressed with the same quantization matrix[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology. 2022, 32(9): 6002-6016.
- [5] SINGH R, SARASWAT M, ASHOK A, et al. From classical to soft computing based watermarking techniques: A comprehensive review [J]. Future Generation Computer Systems, 2023, 141: 738-754.
- [6] ERNAWAN F, ARIATMANTO D. A recent survey on image watermarking using scaling factor techniques for copyright protection [J]. Multimedia Tools and Applications, 2023, 82(18): 27123-27163.
- [7] COLTUC D. Towards distortion-free robust image authentication [C]// Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2007, 77(1): 012005.
- [8] COLTUC D, CHASSERY J M. Distortion-free robust watermarking: a case study [C]//Security, Steganography, and Watermarking of Multimedia Contents IX(SPIE). 2007: 585-592.
- [9] WANG X, LI X, PEI Q. Independent embedding domain based two-stage robust reversible watermarking[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2019, 30(8): 2406-2417.
- [10] HAZIM H T, ALSEELAWI N, ALRIKABI H T H. A novel method of invisible video watermarking based on index mapping and hybrid DWT-DCT [J]. International Journal of Online & Biomedical Engineering, 2023, 19(4).
- [11] CHEN S, MALIK A, ZHANG X, et al. A fast method for robust video watermarking based on zernike moments [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2023, 33(12): 7342-7353.
- [12] FAN D, ZHAO H, ZHANG C, et al. Anti-recompression video watermarking algorithm based on H.264/AVC[J]. Mathematics, 2023, 11(13): 2913.
- [13] TAKALE S, MULANI A. DWT-PCA based video watermarking[J]. Journal of Electronics, Computer Networking and Applied Mathematics, 2022, 2(06): 1-7.
- [14] FARRIE, AYUBI P. A robust digital video watermarking based on CT-SVD domain and chaotic DNA sequences for copyright protection [J]. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 2023, 14:13113-13137.
- [15] VAIDYA S P, MOULI P C. Robust digital color image watermarking based on compressive sensing and DWT[J]. Multimedia Tools and Applications, 2024, 83(2): 3357-3371.
- [16] WANG H, YUAN Z, CHEN S, et al. Embedding color watermark image to color host image based on 2D-DCT [J]. Optik, 2023, 274: 170585.
- [17] REED I S, SOLOMON G. Polynomial codes over certain finite fields [J]. Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics, 1960, 8(2): 300-304.
- [18] KADIAN P, ARORA S M, ARORA N. Robust digital watermarking techniques for copyright protection of digital data: A survey [J]. Wireless Personal Communications, 2021, 118: 3225-3249.
- [19] QI W, YUE B, WANG D C, et al. An overview on digital content watermarking[C]//Signal and Information Processing, Networking and Computers: Proceedings of the 8th International Conference on Signal and Information Processing, Networking and Computers (ICSINC). Singapore: Springer Nature Singapore, 2022: 1311-1318.
- [20] HASSAN Y A, RAHMAH A M S. An overview of robust video watermarking techniques[J]. Iraqi Journal of Science, 2023(64)7: 3613-3624.
- [21] LAKSHMI H R, BORRA S. Digital video watermarking tools: an overview[J]. International Journal of Information and Computer Security, 2021, 16(1-2): 1-19.
- [22] GARG P, KISHORE R R. Performance comparison of various watermarking techniques[J]. Multimedia Tools and Applications, 2020, 79(35): 25921-25967.
- [23] ABERNA P, AGILANDEESWARI L. Digital image and video watermarking: methodologies, attacks, applications, and future directions[J]. Multimedia Tools and Applications, 2024, 83(2): 5531-5591.
- [24] SINGH R, MITTAL H, PAL R. Optimal keyframe selection-based lossless video-watermarking technique using IGSA in LWT domain for copyright protection [J]. Complex & Intelligent Systems, 2022, 8(2): 1047-1070.
- [25] SHARMA C, AMANDEEP B, SOBTI R, et al. A secured frame selection based video watermarking technique to address quality loss of data: combining graph based transform, singular valued decomposition, and hyperchaotic encryption [J]. Security and Communication Networks, 2021: 1-19.

[作者简介]



梁钰承 (2000-), 男, 广东东莞人, 信息工程大学博士生, 主要研究方向为视频信息隐藏、视频水印。



李军 (1987-), 男, 湖南涟源人, 博士, 武警工程大学讲师, 主要研究方向为信息隐藏技术、多媒体安全。



钮可 (1981-), 男, 浙江湖州人, 武警工程大学副教授, 主要研究方向为信息隐藏、多媒体安全。



孟逸飞 (1999-), 男, 内蒙古包头人, 武警工程大学博士生, 主要研究方向为视频信息隐藏、视频水印。