

基于像素评估与运动补偿预测误差扩展的视频水印算法

李思广¹, 郑逢斌²

(1. 周口职业技术学院 信息工程学院, 周口 466000; 2. 河南大学 计算机与信息工程学院, 开封 475000)

摘要: **目的** 为了解决当前视频水印技术因忽略了视频像素特性与时间的相关性, 从而出现嵌入失真和水印容量较低等不足, 设计一种基于像素评估和运动补偿预测误差扩展的自适应视频水印算法。**方法** 首先, 引入运动补偿预测误差扩展方法, 预估每个视频帧的像素灰度值, 从而获取其对应的运动补偿预测误差。再依据预测误差, 计算像素的运动补偿局部标准差, 将整个视频分割为平滑和非平滑子块。依据运动补偿局部标准差, 结合像素选择阈值, 从平滑块中选择出合适的像素用于嵌入水印。依据评估的水印容量与选择的视频像素, 针对不同的像素, 设计不同的水印嵌入机制, 将水印信息隐藏到视频特定的像素中, 通过完成边信息的嵌入, 从而输出水印视频。最后, 构建水印提取方法, 从水印图像中检测出初始水印。**结果** 测试数据显示, 与当前视频水印方法相比, 所提算法具有更高的水印容量和更低的失真度, 其最大水印容量为 2 bits, 提取水印信息的 PSNR 值在 40 dB 以上。**结论** 所提算法具有良好的不可感知性与较低的失真, 在版权保护、信息防伪等领域具有一定的应用价值。

关键词: 视频水印; 像素评估; 运动补偿预测误差扩展; 像素分类; 像素选择阈值; 水印嵌入; 水印提取
中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)19-0204-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.19.035

Video Watermarking Algorithm Based on Pixel Evaluation and Motion Compensated Prediction Error Extension

LI Si-guang¹, ZHENG Feng-bin²

(1. School of Information Engineering, Zhoukou Vocational and Technical College, Zhoukou 466000, China;

2. School of Computer and Information Engineering, Henan University, Kaifeng 475000, China)

ABSTRACT: The work aims to design an adaptive video watermarking algorithm based on pixel evaluation and motion compensated prediction error expansion in order to solve these defects as embedding distortion and low mark capacity induced by ignorance of the correlation between the video pixel characteristics and the time in current video watermarking technology. Firstly, the motion compensated prediction error expansion was introduced to predict the gray values of each video frame and obtain the corresponding motion compensated prediction error. Then, the local standard deviation of pixel motion compensation was calculated according to the prediction error, and the whole video was divided into smooth and non-smooth sub-blocks. A pixel suitable for embedding watermark was selected from the video according to the local standard deviation of motion compensation and the pixel selection threshold. The watermark embedding mechanism was designed for different pixels based on the watermark capacity and the chosen video pixel to hide the watermark information into the video specific pixels. Finally, the watermark extraction method was constructed to recover the initial watermark information from the watermark image. The test data showed that this algorithm had higher watermark capacity and lower distortion when compared with the current video watermarking method. The maximum watermark capacity was 2 bits and the PSNR value of watermark information was more than 40 dB. This algorithm

收稿日期: 2017-11-09

基金项目: 国家自然科学基金 (41571417, 60973126); 河南省教育厅科学技术研究重点项目 (13A520071); 河南省高等学校重点科研项目 (15A520010)

作者简介: 李思广 (1965—), 男, 硕士, 周口职业技术学院副教授, 主要研究方向为图像处理、网络信息安全、物联网技术。

has good imperceptibility and low distortion, so it has a certain application value in copyright protection, information security and other fields.

KEY WORDS: video watermarking; pixel evaluation; motion compensation prediction error expansion; pixel classification; pixel selection threshold; watermark embedding; watermark extraction

近年来, 数字视频因其具有良好的直观表达能力, 使其数量呈爆炸式增长, 被越来越多的用户所使用, 但是, 在当前开放的网络中传输时, 视频内容容易遭受篡改与攻击, 使其版权保护问题日益突出^[1-2], 因此, 确保视频信息在网络中安全传输, 使其能够抵御网络的外来攻击, 已是当前学者的研究热点与焦点^[3]。视频水印技术就是其中一种解决方案, 其具有良好的不可感知性与稳健性, 它是将水印信息嵌入到视频内容中, 使其只呈现视频的视觉信息, 从而较好保护水印信息^[4]。如王颖等^[5]为了提高视频水印技术的鲁棒性与不可感知性, 设计了基于离散余弦变换的可移除数字视频水印算法, 利用 DCT 机制处理视频图像, 获取相应的 DCT 系数, 并引入 CDMA 调制方法, 处理待嵌入的水印信息, 通过设计水印嵌入方法, 将水印信息隐藏到视频中, 实验结果显示其算法具有较高的鲁棒性。Nilkanta 等^[6]为了改善视频水印技术的鲁棒性, 提出了基于 SIFT 的视频水印算法, 该技术充分利用 SIFT 的尺度不变性提高其抗几何攻击能力, 通过从视频的边平面内提取鲁棒的 SIFT 特征, 根据这些特征的强度变化来确定水印嵌入位置, 再设计相应的水印嵌入机制, 将水印数据嵌入在视频中的合适位置, 实验结果验证了其算法的有效性与优越性。FA 等^[7]为了增强视频水印的鲁棒性, 设计了基于 SURF 特征与块分类的视频水印算法, 该技术是利用每个镜头的最好的帧信息, 以及最优帧的最佳块区域进行水印嵌入, 通过提取帧视频的 SURF 特征, 对其进行匹配, 利用水印嵌入机制, 将水印信息嵌入到最佳块区域中, 并根据匹配特征点, 估算尺度、旋转等参数, 借助边信息来检索最佳块, 利用水印提取技术, 复原水印信息, 实验结果显示此技术具有良好的不可感知性与鲁棒性。

虽然当前视频水印技术具有良好的不可感知性与鲁棒性, 但是, 此类水印技术均是采用同一个水印策略来处理所有载体视频像素, 忽略了视频像素特性与时间相关性, 从而导致其水印容量较小, 且存在较大的嵌入失真, 使得复原水印信息的质量不理想。

为了解决上述问题, 文中设计了基于像素评估与运动补偿预测误差扩展的自适应视频水印算法。并测试了所提视频水印算法的水印容量大小、失真度以及不可感知性。

1 运动补偿预测误差扩展方法及其水印嵌入

在所提水印算法中, 引入运动补偿预测误差方

法^[8-10]来实现水印嵌入。令图像 $I(x, y)$ 的尺寸为 $M \times N$, 依据运动补偿预测误差方法^[8], 对于每个像素, 其灰度值与预测值为 $F(i, j)$, $F'(i, j)$; 则其预测误差为 $H(i, j) = F(i, j) - F'(i, j)$ 。通过对所有的像素进行预测, 可获取所有像素的预测误差值, 将其组合为一个集合 S 。再利用一个辅助阈值^[8-9] t , 将集合 S 分割为 2 个相邻部分。若 $H(i, j) \in [-t, t]$, 则此类像素划分为左半部分; 否则, 将其视为右半部分。通过移动右半部分内的像素, 可以建立左半部分像素的嵌入水印空间, 因此, 在所提算法中, 将阈值 t 视为容量参数。随后, 在依据预测误差扩展方法^[8], 将水印信息 $w \in [0, 1]$ 嵌入到视频中, 其嵌入过程如下所述。

1) 令 $H^w(i, j)$ 与 $F^w(i, j)$ 分别为水印预测误差、嵌入水印后的像素。若 $H(i, j) \in [-t, t]$, 则根据如下函数, 对其进行扩展:

$$H^w(i, j) = 2H(i, j) + w \quad (1)$$

式中: w 为待嵌入水印。

随后, 利用 $H^w(i, j)$, 得到相应的水印像素:

$$F^w(i, j) = F'(i, j) + H^w(i, j) \quad (2)$$

2) 若 $H(i, j) \in [-t, t]$, 则按照如下函数, 获取水印像素:

$$F^w(i, j) = \begin{cases} F(i, j) + t & H(i, j) \geq t \\ F(i, j) - t & H(i, j) < -t \end{cases} \quad (3)$$

再根据如下过程, 提取初始水印:

1) 依据水印像素, 计算其水印误差:

$$H^w(i, j) = F^w(i, j) - F'(i, j) \quad (4)$$

2) 若 $H^w(i, j) \in [-2t, 2t]$, 则水印 w 可被编码为:

$$w = H^w(i, j) - 2 \left\lfloor \frac{H^w(i, j)}{2} \right\rfloor \quad (5)$$

3) 依据式 (5), 则初始视频像素被复原:

$$F(i, j) = F^w(i, j) - \left\lfloor \frac{H^w(i, j)}{2} \right\rfloor - w \quad (6)$$

式中: $\lfloor \cdot \rfloor$ 为向下取整运算。

4) 若 $H^w(i, j) \notin [-2t, 2t]$, 则此时的初始视频像素被复原为:

$$F(i, j) = \begin{cases} F^w(i, j) - t & H^w(i, j) \geq 2t \\ F^w(i, j) + t & H^w(i, j) < -2t \end{cases} \quad (7)$$

根据文献[8]可知, 运动补偿预测误差方法能够很好地消除视频帧的时间相关性。但是, 这种方法是将相同的预测值 $F'(i, j)$ 用于水印嵌入与提取, 导致

其容量较小。

2 视频水印算法设计

为了兼顾视频水印容量与安全性,文中设计了一种新的水印技术,其过程见图1,其分为4个阶段:视频帧的分块、子块像素的选择、水印嵌入机制、水印信息的提取。

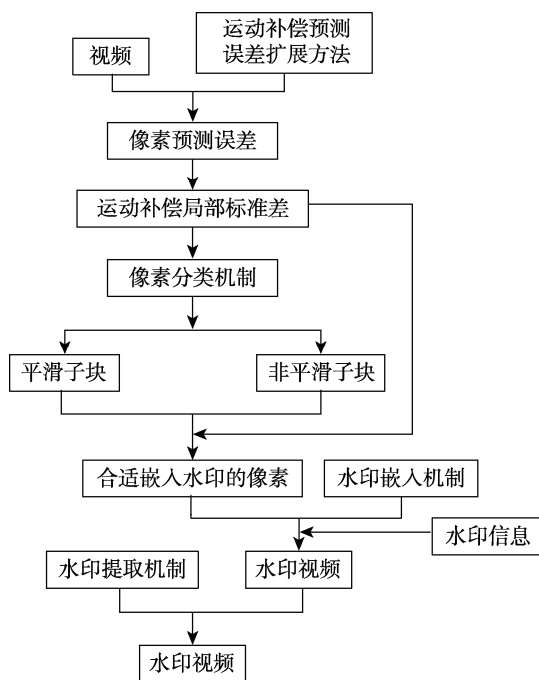


图1 所提视频水印算法过程

2.1 视频帧的分块

依据式(2),对于视频帧的任意像素,令其预测误差 $H(i,j)=e$,当将 $s=1$ bits 的水印信息嵌入其中,则其平均失真度 $D_1(e)$ 为:

$$D_1(e) = E \left[\left(F^w(i,j) - F(i,j) \right)^2 \right] = E \left[(e+s)^2 \right] = e^2 + e + 0.5 \quad (8)$$

若将 $s=2$ bits 的水印信息嵌入其中,则其相应的水印像素为:

$$F^w(i,j) = F'(i,j) + 2(2H(i,j) + b_1) + b_2 = F(i,j) + 3H(i,j) + 2b_1 + b_2 \quad (9)$$

其中, $b_1, b_2 \in \{0,1\}$ 为常数。

依据式(9),则其平均失真度 $D_2(e)$ 为:

$$D_2(e) = 0.25 \sum_{b_1, b_2 \in \{0,1\}} (3e + 2b_1 + b_2) = 9e^2 + 9e + 3.5 \quad (10)$$

由式(8)和式(10)可知, $D_2(e) > D_1(e)$,意味着嵌入 2 bits 的水印信息引起的失真度要大于 1 bits。但是,若嵌入 1 bits 引起的误差 $|e_1|$ 大于 $|e_2|$ 时,则嵌入 2 bits 的水印信息引起的失真度要小于 1 bits。

为了降低这种失真度,应该要根据每个像素的预测误差来嵌入合适的水印信息,因此,引入运动补偿标准差 $M^{[11]}$ 来确定每个子块的水印嵌入容量。令 M_{kd} 表示第 k 个子块 B_{kd} 的运动补偿标准差,其函数为^[11]:

$$M_{kd} = \sqrt{\frac{1}{b \times b} \sum_i \sum_j [B_{kd}(i,j) - B'_{kd}(i,j)]^2} \quad (11)$$

式中: $B'_{kd}(i,j)$ 为第 k 个子块 B_{kd} 中位于 (i,j) 处的像素经过块匹配方法^[10]得到的运动补偿预测值; $b \times b$ 为子块的尺寸。

在所提水印算法中,依据式(11)计算所有子块的运动补偿标准差。然后,依据运动补偿标准差,将所有子块分类为平滑块与非平滑块。根据自适应嵌入阈值 Δ_{aet} ,当 $M_{kd} < \Delta_{aet}$,则此子块为平滑块;反之,其为非平滑块。

2.2 像素的选择

在平滑子块中,仍有部分像素不适合用于嵌入水印,为此,文中根据运动补偿局部标准差来定义像素选择机制,从每个子块中选择出合适的像素。令第 k 帧视频 F_k 中位于 (i,j) 处的像素为 P ,则其运动补偿局部标准差为 L :

$$L_k(i,j) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{(p,r) \in N_k(i,j)} [F'_k(p,r) - A_k(i,j)]^2} \quad (12)$$

$$A_k(i,j) = \frac{1}{N_s} \sum_{(i,j) \in N_k(i,j)} F'_k(i,j) \quad (13)$$

式中: $L_k(i,j)$ 为第 k 帧视频中位于 (i,j) 处像素的运动补偿局部标准差; $N_k(i,j)$ 是相邻视频帧 F'_k 中,以 (i,j) 为中心的子块; N_s 为 $N_k(i,j)$ 中的像素数量; A 为 $N_k(i,j)$ 内所有像素的局部均值。

依据式(13),计算所有像素的运动补偿局部标准差 L 。然后,基于像素选择阈值 Δ_{pst} ,当某个像素的 $L_k(i,j) \leq \Delta_{pst}$ 时,则此像素被选中,用于嵌入水印信息;反之,则此像素不嵌入任何水印。

2.3 水印嵌入机制

令某一段视频的帧数量为 n ,每一帧的尺寸为 $M \times N$,且需嵌入的水印位数量为 $|N_c|$,总的水印容量为 T_{cp} ,则整个水印嵌入过程为:

1) 根据运动补偿预测误差方法,获取第 k 帧视频 F_k 的运动补偿预测值 F'_k ;再计算其相应的误差 $H_k = F_k - F'_k$ 。

2) 将 F_k 分割为若干个非重叠子块,每个子块的尺寸为 $b \times b$,利用式(11)计算每个子块的运动补偿标准差 M ,若 $M_{kd} < \Delta_{aet}$,则其为平滑子块,将这些子块组合成一个集合 $B_{fk}(d)$ 。反之,若 $M_{kd} \geq \Delta_{aet}$,则其为非平滑子块,从而得到一个集合 $B_{rk}(d)$ 。

3) 在平滑子块集合 $B_{fk}(d)$ 中,其所有可扩展的像素所形成的集合为 $E_{Bf}(k, T_{cp})$:

$$\begin{cases} E_{Bf}(k, T_{cp}) = \begin{cases} -t \leq H_k(i, j) < t, 0 \leq F_k(i, j) + \\ 3 \lfloor H_k(i, j) \rfloor \leq 255 \end{cases} \\ t = \lfloor T_{cp}/3 \rfloor \end{cases} \quad (14)$$

式中：\$t\$ 为辅助阈值。

其中可移动的像素所形成的集合为 \$S_{Bf}(k, T_{cp})\$：

$$\begin{cases} S_{Bf}(k, T_{cp}) = \{ -t \leq H_k(i, j) < t, F_k(i, j) \leq 255 - 3t \} \\ \cup \{ H_k(i, j) < -t, F_k(i, j) \geq 3t \} \\ t = \lfloor T_{cp}/3 \rfloor \end{cases} \quad (15)$$

4) 同理，在非平滑子块集合 \$B_{rk}(d)\$ 中，其所具有可扩展的像素所形成的集合为 \$E_{Br}(k, T_{cp})\$：

$$E_{Br}(k, T_{cp}) = \begin{cases} -T_{cp} \leq H_k(i, j) < T_{cp}, 0 \leq \\ F_k(i, j) + \lfloor H_k(i, j) \rfloor \leq 254 \end{cases} \quad (16)$$

其中可移动的像素所形成的集合为 \$S_{Br}(k, T_{cp})\$：

$$\begin{cases} S_{Br}(k, T_{cp}) = \{ T_{cp} \leq H_k(i, j), F_k(i, j) \leq 255 - T_{cp} \} \cup \\ \{ H_k(i, j) < -T_{cp}, F_k(i, j) \geq T_{cp} \} \end{cases} \quad (17)$$

再依据式 (14—17)，所有子块中溢出的像素集合为 \$O(k, T_{cp})\$：

$$\begin{aligned} O(k, T_{cp}) = & (B_{fk} - E_{Bf}(k, T_{cp}) - S_{Bf}(k, T_{cp})) \cup \\ & (B_{rk} - E_{Br}(k, T_{cp}) - S_{Br}(k, T_{cp})) \end{aligned} \quad (18)$$

在上述集合中，\$E_{Bf}(k, T_{cp})\$ 与 \$E_{Br}(k, T_{cp})\$ 中的像素分别可扩展为 2 bits 与 1 bits，因此，在第 \$k\$ 帧视频 \$F_k\$ 中，其总的隐藏水印位数量为：

$$C_k = 2|E_{Bf}(k, T_{cp})| + |E_{Br}(k, T_{cp})| \quad (19)$$

在式 (19) 中，对于第 \$k\$ 帧视频 \$F_k\$，其边信息的二值表示会存储在序列 \$S_{Ik}\$ 中；则嵌入在 \$F_k\$ 中的水印位数量为 \$|P_k| = C_k - |S_{Ik}|\$。因此，在整个视频的总水印载荷为 \$C = \sum_{k=1}^n |P_k|\$。

5) 像素选择阈值 \$\Delta_{pst} \in [1, 2 \dots 255]\$ 的计算。依据前文可知，在平滑子块、非平滑子块中的可扩展像素构成的集合 \$E_{Bf}(k, T_{cp})\$，\$E_{Br}(k, T_{cp})\$ 可定义为：

$$\begin{cases} E_{Bf}(k, T_{cp}, \Delta_{pst}) = \{ (i, j) \in E_{Bf}(k, T_{cp}) : L_k(i, j) \leq \Delta_{pst} \} \\ E_{Br}(k, T_{cp}, \Delta_{pst}) = \{ (i, j) \in E_{Br}(k, T_{cp}) : L_k(i, j) \leq \Delta_{pst} \} \end{cases} \quad (20)$$

由于在集合 \$E_{Bf}(k, T_{cp})\$，\$E_{Br}(k, T_{cp})\$ 中的像素水印位分别是 2 bits 与 1 bits，因此，在整个视频的总水印位数量为：

$$C(T_{cp}, \Delta_{pst}) = \sum_{k=1}^{LF} \left[2|E_{Bf}(k, T_{cp}, \Delta_{pst})| + |E_{Br}(k, T_{cp}, \Delta_{pst})| \right] \quad (21)$$

嵌入的水印位数量为 \$|N_c|\$，因此，像素选择阈值 \$\Delta_{pst}\$ 的选择是根据 \$C(T_{cp}, \Delta_{pst}) \geq |N_c|\$ 的最小整数来确定的。若集合 \$E_{Bf}(k, T_{cp})\$，\$E_{Br}(k, T_{cp})\$ 中所有像素均用于嵌入水印，则像素选择阈值 \$\Delta_{pst} = 255\$。

6) 像素选择与自适应嵌入。若 \$L_k(i, j) \leq \Delta_{pst}\$，且 \$(i, j) \notin O(k, T_{cp})\$，则其水印嵌入过程如下：

若像素 \$(i, j) \in E_{Bf}(k, T_{cp})\$，依据前文的运动补偿预测误差扩展方法，则将 2 bits 的水印容量嵌入此像素中：

$$F_k^w(i, j) = F_k(i, j) + 3 \lfloor H_k(i, j) \rfloor + 2 \quad (22)$$

若像素 \$(i, j) \in S_{Bf}(k, T_{cp})\$，且阈值 \$t = \lfloor T_{cp}/3 \rfloor\$，则通过如下函数改变其像素值：

$$F_k^w(i, j) = \begin{cases} F_k(i, j) + 3t & H_k(i, j) \geq t \\ F_k(i, j) - 3t & H_k(i, j) < -t \end{cases} \quad (23)$$

若像素 \$(i, j) \in E_{Br}(k, T_{cp})\$，依据前文的运动补偿预测误差扩展方法，则将 1 bits 的水印容量嵌入此像素中：

$$F_k^w(i, j) = F_k(i, j) + \lfloor H_k(i, j) \rfloor + 1 \quad (24)$$

若像素 \$(i, j) \in S_{Br}(k, T_{cp})\$，则通过如下函数改变其像素值：

$$F_k^w(i, j) = \begin{cases} F_k(i, j) + T_{cp} & H_k(i, j) \geq T_{cp} \\ F_k(i, j) - T_{cp} & H_k(i, j) < -T_{cp} \end{cases} \quad (25)$$

对于图像中的剩余像素，则不嵌入水印，即 \$F_k^w(i, j) = F_k(i, j)\$。

7) 边信息的嵌入。首先，将水印像素 \$F_k^w(i, j)\$ 中的前 \$|S_{Ik}|\$ 个像素的最不重要位存储在序列 \$L_{SBk}\$ 中。反复执行步骤 6)，从第 1 个像素到最后一个水印像素，将水印位嵌入到 \$L_{SBk}\$ 中，从而得到第 \$k\$ 帧的水印视频 \$F_k^w\$。

2.4 水印信息的提取

1) 边信息的提取。令 \$k\$ 为水印视频帧的序号，根据 \$\Delta_{pst}\$、\$T_{cp}\$、像素坐标 \$P \in O(k, T_{cp})\$，从 \$F_k^w\$ 中的前 \$|S_{Ik}|\$ 个像素中提取其最不重要位。

2) 根据视频的运动矢量，计算水印视频 \$F_k^w\$ 的运动补偿预测值，用 \$F_k'^w\$ 表示。

3) 再计算 \$F_k'^w\$ 的水印运动补偿预测误差值 \$H_k^w = F_k^w - F_k'^w\$。

4) 依据式 (12) 计算水印视频 \$F_k^w\$ 的 \$L_k\$。

5) 若 \$L_k(i, j) \leq \Delta_{pst}\$，且 \$(i, j) \notin O(k, T_{cp})\$，则其水印提取与视频复原过程如下：

若像素 \$(i, j) \in B_{fk}\$，且 \$H_k^w(i, j) \in [-4t, 4t]\$，则通过计算 \$\lfloor H_k^w(i, j) \rfloor - 4 \lfloor H_k^w(i, j)/4 \rfloor\$，从此像素中提取 2 bit

的水印信息,并利用如下函数,复原初始视频像素值:

$$F_k(i, j) = F_k^w(i, j) - 3 \left\lfloor \frac{H_k(i, j)}{4} \right\rfloor - 2 \quad (26)$$

若像素 $(i, j) \in B_{fk}$, 且 $H_k^w(i, j) \in [255, -4t] \cup [4t, 255]$, 根据如下函数,复原初始视频像素值:

$$F_k(i, j) = \begin{cases} F_k^w(i, j) - 3t' & H_k^w(i, j) \geq 4t \\ F_k^w(i, j) + 3t & H_k^w(i, j) < -4t \end{cases} \quad (27)$$

若像素 $(i, j) \in B_{rk}$, 且 $H_k^w(i, j) \in [-2T_{cp}, 2T_{cp}]$, 则通过计算 $H_k^w(i, j) - 2 \lfloor H_k^w(i, j)/2 \rfloor$, 从此像素中提取 1 bit 的水印信息,并利用如下函数,复原初始视频像素值:

$$F_k(i, j) = F_k^w(i, j) - \left\lfloor \frac{H_k(i, j)}{2} \right\rfloor - 1 \quad (28)$$

若像素 $(i, j) \in B_{rk}$, 且 $H_k^w(i, j) \in [255, -2T_{cp}] \cup [2T_{cp}, 255]$, 根据如下函数,复原初始视频像素值:

$$F_k(i, j) = \begin{cases} F_k^w(i, j) - T_{cp} & H_k^w(i, j) \geq 2T_{cp} \\ F_k^w(i, j) + T_{cp} & H_k^w(i, j) < -2T_{cp} \end{cases} \quad (29)$$

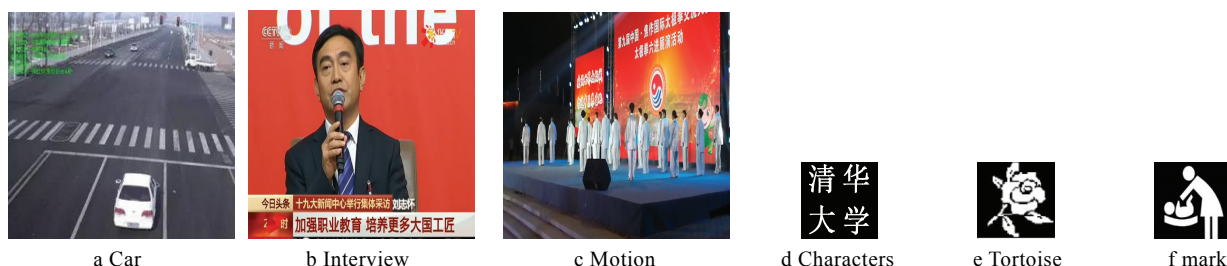


图2 视频样本与水印信息

Fig.2 Video samples and watermark information

3.1 视频水印质量测试分析

利用文中水印技术与文献[5]、文献[6]算法将图 2d—f 的水印信息分别隐藏到图 2a—c 中,结果见图 3—5。由水印效果可知,所提视频水印算法与文献[5]、文献[6]算法都有良好的不可感知性,水印信息成功隐藏在载体中,非用户人员无法从水印视频中获取任何水印内容,整个输出结果只呈现出载体图像的相关信息。

为了客观量化 3 种视频水印机制的信息隐秘程度,测试了水印前后的视频帧图像的直方图来评价其不可感知性。通常而言,如果嵌入水印后的视频帧图像的直方图与初始视频图像的直方图很相似,则说明水印视频的信息变化较小,没有引起初始视频的大幅变动,使得二者的视觉感知强度一致,显示其不可感知性更高。为此,统计了图 3a、图 3b—e 的直方图,结果见图 6;并计算了这些水印视频图像的峰值信噪比 PSNR^[12],输出数据见表 1。根据直方图可知,所提视频水印技术的直方图与初始视频很接近,较好地保持了初始视频的直方图分布特性,见图 6b,而文

献[5]、文献[6]的视频水印技术的直方图特征,和初始视频的直方图均有一定的差别,特别是文献[5]的水印技术,所输出的水印视频的直方图与初始视频差别较大,表明其嵌入水印后,引起了较大的载体内容变化,致使其不可感知不理想。同时,根据表 1 的数据,所提视频水印技术的 PSNR 值最大,约为 46.29 dB,但是,文献[5]、文献[6]算法的 PSNR 值都是小于所提算法,分别为 40.54, 43.71 dB。原因是所提水印技术通过利用运动补偿预测误差扩展方法来消除视频帧的时间相关性,依据运动补偿局部标准差,将整个视频分割为平滑与非平滑子块,通过像素选择机制,从平滑块中选择出合适的像素用于嵌入水印,再基于评估的水印容量与选择的视频像素,针对不同的像素,设计不同的水印嵌入机制,将水印信息隐藏到视频特定的像素中,降低了嵌入失真,使其修改初始视频的范围较小,使其不可感知性最佳。但是,文献[5]则是利用离散余弦变换与 CDMA 调制方法来将水印信息嵌入到整个视频中,引起的修改范围较大,使其

对于图像中的剩余像素,则不嵌入水印,即

$$F_k(i, j) = F_k^w(i, j)。$$

6) 再利用水印序列 L_{SBk} 来替代 F_k^w 中前 $|S_{fk}|$ 个像素的最不重要位,复原初始视频中的最不重要位。

7) 从第一像素开始,根据步骤 6) 来处理 F_k^w 中的每个像素,直到像素坐标 $P \in O(k, T_{cp})$,以提取水印信息与复原初始视频 F_k 。

3 实验结果与分析

为了测试所提视频水印技术的不可感知性与提取质量,借助 VS2010 软件来完成实验,为了反映所提方法的优越性,并将文献[5]、文献[6]视为对照组。实验条件为:DELL, 3.5 GHz, 双核 CPU, 500 GB 硬盘与 8 G 内存。在该次实验中,使用了一段 35 s 的视频,帧率为 15 帧/s,采用 3 个样本,见图 2a—c,用户水印信息见 2d—f;且在像素选择过程中,邻域尺寸为 3×3 ;子块尺寸 $b \times b = 3 \times 3$ 、像素选择阈值 $\Delta_{pst} = 255$ 。

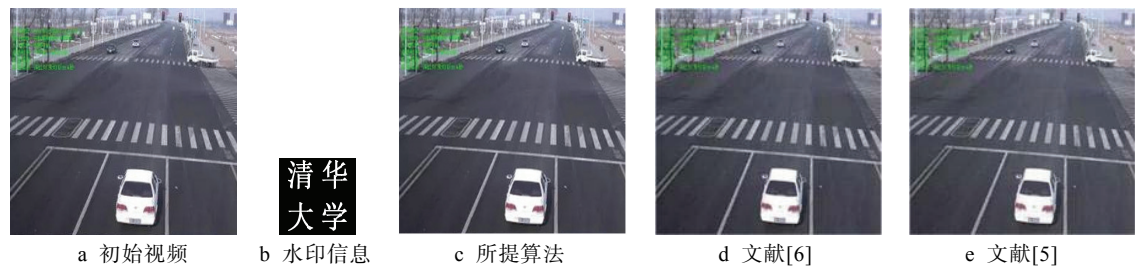


图 3 3 种算法对视频 Car 的水印嵌入结果

Fig.3 Watermark embedding results of the car in the video by three algorithms



图 4 3 种算法对视频 Interview 的水印嵌入结果

Fig.4 Watermark embedding results of the interview in the video by three algorithms



图 5 3 种算法对视频 Motion 的水印嵌入结果

Fig.5 Watermark embedding results of motion in the video by three algorithms

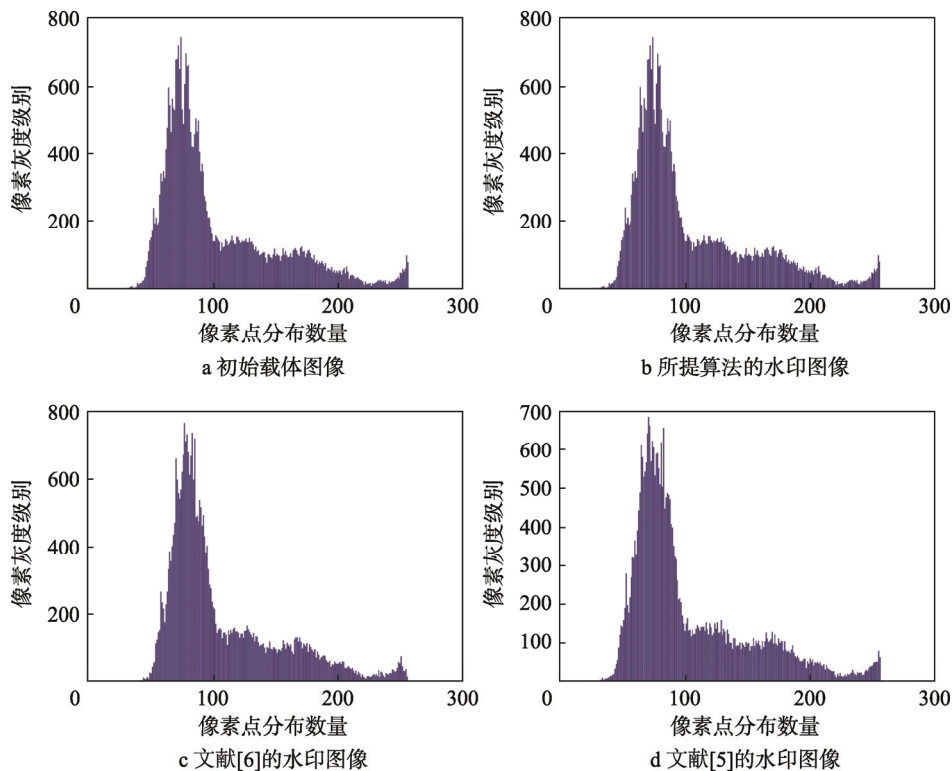


图 6 初始视频以及水印视频对应的直方图

Fig.6 Histogram corresponding to initial video and watermark video

表1 各水印视频的 PSNR 值
Tab.1 PSNR value of each watermark video dB

文中算法	文献[5]	文献[6]
46.29	40.54	43.71

不可感知性最差。文献[6]则是根据 SIFT 特征的强度变化来确定水印嵌入位置,通过设计相应的水印嵌入机制,将水印数据嵌入在视频中的合适位置,使其引起的范围较小,但是此技术利用同一个嵌入策略来实现特定位置的所有像素嵌入,容易引起一定的嵌入失真,削弱了其不可感知性。

3.2 视频水印容量与抗失真性测试

除了信息的不可感知性之外,水印容量以及抗失真能力^[13]也是评估水印技术的重要指标。故此次实验以图 5c—e 为目标,利用所提水印技术、文献[5]、文献[6]机制相应的水印信息提取方法,从图 5c—e 中复原初始水印信息,观察三者的输出水印信息的视觉质量,同时,利用峰值信噪比^[14]PSNR 与相关系数 NC^[15]来客观评估,结果见表 2。依表 2 可知,所提技术的水印提取质量最好,其失真程度最低,与初始水印的相似度最高,对应的 PSNR, NC 值最高,分别为 45.84 dB, 0.973。而文献[5]的提取水印质量最低,其失真率较大,其对应的 PSNR, NC 值分别为 41.27 dB, 0.905。而文献[6]的提取水印质量要明显优于文献[5],其失真度较小,对应的 PSNR, NC 值分别为 43.96 dB, 0.941。

为了测试 3 种算法的水印容量,文中测试在多种嵌入率下的水印提取的失真程度,将图 3a、图 4a、图 5a 作为对象,利用所提技术、文献[5]、文献[6]从每种嵌入率对应的水印视频中复原水印,形成了相应

的 PSNR 曲线,相关数据见图 7。根据测试曲线可知,对于 3 个测目标,在不同的嵌入率下,3 种视频水印技术的水印提取质量均在降低,然而,所提视频水印方案的性能最佳,所提水印方法的稳定性最好,其允许的嵌入率可达 2 位,且对应的 PSNR 值要高于文献[5]、文献[6];文献[5]、文献[6]算法的每个像素所允许的水印嵌入率均小于 1 位。这些数据表明所提技术具有更低的水印嵌入失真与更高的水印容量。原因是所提技术是通过考虑视频图像的不同特性像素的位置区域,提出了差异容量的水印嵌入机制,对于不同特性的像素嵌入不同容量的水印位,将容量为 2, 1 bits 的水印信息分别嵌入到载体的平滑子块与非平滑子块中,可以有效避免嵌入水印位的溢出和下溢问题,从而最大化水印系统的容量与降低水印信息的丢失程度,继而提高了算法的抗失真能力。文献[5]、文献[6] 2 种技术均为采用了同一个水印策略来处理所有载体像素,把相同容量的水印信息嵌入到载体像素中,忽略了视频像素特性与时间相关性,容易造成水印位的溢出和下溢问题,无法自适应调整像素的嵌入容量,使其水印容量较小与抗失真能力不理想。

表2 不同算法的水印提取效果
Tab.2 Watermark extraction effect by different algorithms

名称	PSNR/dB	NC	复原水印信息
文中算法	45.84	0.973	
文献[5]	41.27	0.905	
文献[6]	43.96	0.941	

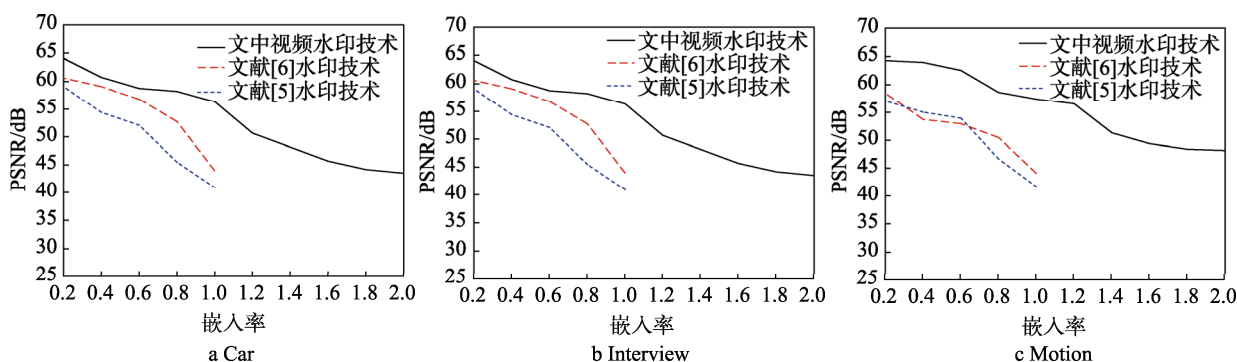


图7 各算法的水印容量与 PSNR 曲线测试

Fig.7 Watermark capacity of each algorithm and PSNR curve test

4 结语

通过设计一种分类嵌入策略,提出了基于像素评估与运动补偿预测误差扩展的自适应视频水印算法。引入运动补偿预测误差扩展方法来预测每个视频帧的像素值,并将整个视频分解成平滑与非平滑子块。

与传统的视频水印技术不同,所提水印技术是利用不同的水印嵌入策略来处理不同特性的视频帧子块。通过像素选择机制,确定出合适的像素,依据容量评估结果,将合适容量大小的水印嵌入到像素中,且运动补偿预测误差值较高的像素则不嵌入水印,保留其原内容,以降低失真现象,从而有效提高了其水印容

量与降低失真程度。试验数据表明, 所提水印技术能够较好地将水印信息隐藏到视频中, 且具备大容量水印嵌入特性, 用户能够获取失真度更低的复原水印质量。

参考文献:

- [1] 余勇. 基于奇异值分解的 Contourlet 域水印算法[J]. 包装工程, 2017, 38(7): 202—205.
YU Yong. Contourlet Domain Watermarking Algorithm Based on Singular Value Decomposition[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(7): 202—205
- [2] 石红芹, 王艳, 余鹰. 基于压缩感知的强鲁棒性彩色图像双水印算法[J]. 包装工程, 2017, 38(17): 174—178.
SHI Hong-qin, WANG Yan, YU Ying. Robust Color Image Dual Watermarking Algorithm Based on Compressed Sensing [J]. Packaging Engineering, 2017, 38(17): 174—178
- [3] 蔡春亭, 冯桂, 王驰. 基于帧内预测模式多划分的 HEVC 鲁棒视频水印算法[J]. 计算机应用, 2017, 37(6): 1772—1776.
CAI Chun-ting, FENG Gui, WANG Chi. HEVC Robust Video Watermarking Algorithm Based on Intra Prediction Mode Multi Partition [J]. Computer applications, 2017, 37(6): 1772—1776.
- [4] YOO G, KIM H. Real-time Video Watermarking Techniques Robust Against Re-encoding[J]. Journal of Real-Time Image Processing, 2017, 13(3): 467—477.
- [5] 王颖, 袁开国, 席敏超. 基于离散余弦变换的可移除数字视频水印算法[J]. 计算机工程, 2015, 41(5): 169—174.
WANG Ying, YUAN Kai-guo, XI Min-chao. A Removable Digital Video Watermarking Algorithm Based on Discrete Cosine Transform[J]. Computer Engineering, 2015, 41(5): 169—174.
- [6] SAHU N, SUR A. SIFT Based Video Watermarking Resistant to Temporal Scaling[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2017, 45(6): 77—86.
- [7] FA T, ZHA B. A New Robust Video Watermarking Algorithm Based on SURF Features and Block Classification[J]. Multimedia Tools & Applications, 2016, 32(7): 1—9.
- [8] ZENG X, CHEN Z, CHEN M. Reversible Video Watermarking Using Motion Estimation and Prediction Error Expansion[J]. Presented at Journal of Information Science Engineering, 2011, 27(2): 465—479.
- [9] VURAL, C, BARAKL B. Reversible Video Watermarking Using Motion Compensated Frame Interpolation Error Expansion[J]. Signal Image & Video Processing, 2015, 9(7): 1613—1623.
- [10] 叶登攀. 图像认证及视频数字水印的若干算法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2005.
YE Pan-deng. Algorithms for Image Authentication and Video Digital Watermarking[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2005.
- [11] BARROIS G, CORON A, OLIVIER L. Automatic Motion Estimation Using Flow Parameters for Dynamic Contrast-enhanced Ultrasound[J]. Physics in Medicine and Biology, 2015, 60(6): 2117—2133.
- [12] 孙慧, 石艳娇, 王建中. 一种基于运动目标的视频水印方法[J]. 计算机工程, 2013, 39(2): 155—159.
SUN Hui, SHI Yan-jiao, WANG Jian-zhong. A Video Watermarking Method Based on Moving Objects[J]. Computer Engineering, 2013, 39(2): 155—159.
- [13] 任克强, 罗桃建, 喻玲娟. 基于预测失真的自适应两遍嵌入可逆图像水印[J]. 微电子学与计算机, 2017, 34(8): 87—92.
REN Ke-qiang, LUO Tao-jian, YU Ling-juan. Adaptive Two Pass Embedding Reversible Image Watermarking Based on Predictive Distortion [J]. Microelectronics and Computers, 2017, 34(8): 87—92.
- [14] MAIORANA E. High-capacity Watermarking of High Dynamic Range Images[J]. EURASIP Journal on Image and Video Processing, 2016, 23(1): 1—15.
- [15] KHORSAND M R. A New Approach for Digital Image Watermarking to Predict Optimal Blocks Using Artificial Neural Networks[J]. Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, 2017, 25(1): 644—654.