

基于 H.264 的漂移深度控制视频隐写算法

尤 星^{1,2}, 谢东峰^{1,2}, 李宝清², 袁晓兵²

(1. 中国科学院大学, 北京 100049; 2. 上海微系统与信息技术研究所, 上海 200050)

摘 要: 在 H.264/AVC 视频压缩域隐写技术中, 失真漂移问题极大地影响了信息嵌入的容量和稳定性. 本文结合工程实际和实验, 发现并指出了漂移传播的实质性规律, 提出了相应的改进策略. 首先, 提出了漂移分级的控制策略, 依据不同视频质量及隐蔽性要求自适应地调整失真漂移的传播范围, 改进了视频隐写的隐蔽性和安全性; 进而通过对漂移影响分层分析, 挖掘出了更多的隐写位置, 增加了隐写容量及选择隐写方案的灵活性. 形成了一种新的扩容视频隐写算法——漂移深度控制算法. 实验结果和分析表明, 该算法能有效地减小嵌入偏移, 隐写容量、视频质量及安全性都有较大提升.

关键词: 视频隐写; 预测漂移; 漂移深度控制; 失真补偿

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2014)07-1284-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2014.07.007

A Drift-Depth Control Scheme for Video Steganography in H.264 Stream

YOU Xing^{1,2}, XIE Dong-feng^{1,2}, LI Bao-qing², YUAN Xiao-bing²

(1. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China;

2. Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Shanghai 200050, China)

Abstract: Distortion drift is a crucial factor for the embedding capacity and stability of H.264/AVC video in compression domain. In this work, considering practical application, we have exploited the substantive regularities that result in distortion drift. Accordingly, some improvements are made to adapt the influence of distortion drift. Firstly, a drift-depth strategy is proposed to improve the embedding invisibility and security, which can control the distortion range according to requirements of video quality. Secondly, through the analysis of the influence of different drift spreading range, more appropriate steganography positions are discovered to increase the embedding capacity and flexibility. Finally, a drift-depth control scheme is presented. Both analytical and simulation results show that our proposed scheme can improve embedding capacity and security, and meanwhile minimize distortion drift.

Key words: video steganography; prediction drift; drift-depth control; distortion compensation

1 引言

随着电子信息技术的飞速发展, 新一代视频编解码标准 H.264/AVC 被广泛使用, 从而使得视频信息隐藏较其他格式的载体具有更大的吸引力^[1]. 然而, H.264/AVC 编码标准的高压缩率使得视频文件中冗余度及掩蔽空间更小, 大大增添了视频信息隐藏的研究难度. 因此针对 H.264/AVC 视频压缩标准开展提高隐写算法效率的研究有其深远的意义.

迄今为止基于 H.264/AVC 的视频隐写算法大致分为像素域、变换域及压缩域三类^[2]. 前两类借鉴于图像隐写, 需要全解码, 不符合低复杂度和易于终端实现的

实际要求^[3]. 而压缩域算法以其更优的实时性、可逆性, 成为 H.264/AVC 隐写的研究主要方向.

H.264/AVC 压缩域隐写面临的最大问题就是失真漂移^[4]. H.264/AVC 较其他图像视频编码使用了更多的启发式预测过程, 大大提升编码效率的同时使得 H.264 对编码中的微小变化十分敏感^[5]. 由于嵌入而产生的误差累积, 一旦引起预测漂移, 视频质量将急剧下降.

对此, 文献[6]首次提出了 ICT 系数中嵌入 1 比特信息以避免误差漂移的方法. 继文献[6]之后, 目前较为有效地避免误差漂移的隐写算法有两类: 一类是通过数据补偿的方法来消除误差, 在量化残差数据中嵌入水印, 而后根据原始像素与水印重构后的像素之间的误

差,对 ICT 系数补偿^[7-9];另一类则是通过避免误差进入预测环节,来去除失真漂移向后续块的传播,以防止破坏视频质量^[10-12].如通过只选择误差位置不用于后续预测的宏块嵌入信息,或通过系数成对嵌入将预测位置的误差抵消.

以上算法有很大的积极意义,在一定程度上解决了误差漂移的问题.但在对上述方案进行的工程实践和实验中我们发现,现有的避免漂移的方法并不很成熟,不具有全面性和代表性,效果也参差不齐.如误差相消法虽然能消除部分误差累积,但引入补偿数据却使得误差成倍增大;部分非对系数位置的少量嵌入不一定造成崩溃现象,某些误差传播也并不会大面积扩散.这都说明:对失真漂移的处理方法还有较大的拓展空间,采取适当的控制方法可以实现进一步增大隐写容量的同时提升含密视频的质量和安全性.

本文从理论上深入分析引起误差漂移的形成机理、影响因素,创造性地提出了漂移分层分析、分级控制的改进方案.增大了隐写容量及选择隐写方案的灵活性,挖掘更多的隐写位置,依据不同视频质量及隐蔽性要求自适应地调整失真漂移的传播范围,从而改进了视频隐写的综合性能.形成了一种新的扩容视频隐写算法——漂移深度控制算法.实验结果和分析表明,该算法能有效地减小嵌入偏移,隐写容量、视频质量及安全性都有较大提升.

2 漂移规律的形成机理探讨

2.1 帧内预测漂移概念及符号说明

本文算法以视频压缩域的 DCT 系数作为隐写载体,因平坦区域嵌入数据容易引起视觉上的敏感,选择 4×4 划分的亮度系数块作为隐写载体.

在 H.264 标准中, 4×4 帧内预测包含 9 种预测模式,按不同预测方向标示为模式 0~8,如图 1 所示.在预测过程中涉及的漂移敏感像素位置为 d、h、l、m、n、o、p.在不同预测模式下,这些敏感像素点的预测误差受到不同程度的影响.

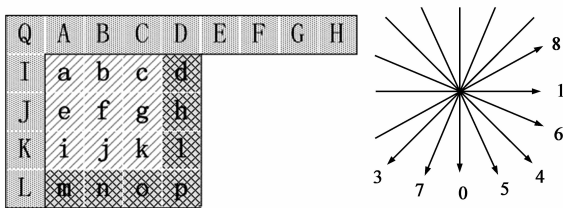


图1 帧内预测及9种预测模式方向

为使表达清晰简练,现将文中用到的符号及缩写代号的含义表述集中列举如下:

$s_{x,y}$: 4×4 块矩阵中任意位置 (x, y) 处的数据

$\Delta_{x,y}$: 任意位置 (x, y) 处的嵌入量

Δ_i : 点 i 处的嵌入量

R : 原始残差像素矩阵

Y : ICT 变换后的系数矩阵

Y' : 嵌入后的含密系数矩阵

θ : 秘密信息嵌入形成的误差矩阵

C, E_i : IDCT 变换常数矩阵

Q_{step} : 量化步长

B_{current} : 当前亮度块

$m - B_{\text{curr}}$: 当前亮度块的预测模式编号

$m - B_{\text{LD}}, m - B_{\text{D}}, m - B_{\text{R}}, m - B_{\text{RD}}$: B_{current} 左下方、下方、右方、右下方亮度块的预测模式编号.

2.2 漂移规律的提出及形成机理分析

引言中例举的由工程实践发现的两点现象,表明并非所有情况下的漂移传播都是无限的,通过分析有限传播的漂移规律,可以扩大隐写嵌入的范围,减少误差的引入.现以下面的理论推导和实验来进一步证明,从而引出改进失真漂移的思路.

视频码流经解码器熵解码后,经过反量化和反 ICT 变换,可以得到最终的残差数据 R :

$$R = \text{round}[C_i^T(Y \otimes E_i)C_i] \quad (1)$$

因嵌入产生的偏移则为:

$$\begin{aligned} E &= R' - R \\ &= \text{round}[C_i^T(Y' \otimes E_i)C_i] - \text{round}[C_i^T(Y \otimes E_i)C_i] \\ &= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & \frac{1}{2} \\ 1 & \frac{1}{2} & -1 & -1 \\ 1 & -\frac{1}{2} & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -\frac{1}{2} \end{bmatrix} \left(\theta \otimes \begin{bmatrix} a^2 & ab & a^2 & ab \\ ab & b^2 & ab & b^2 \\ a^2 & ab & a^2 & ab \\ ab & b^2 & ab & b^2 \end{bmatrix} \right) \\ &= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \\ \frac{1}{2} & -1 & 1 & -\frac{1}{2} \end{bmatrix} \cdot \end{aligned} \quad (2)$$

例如 $\theta = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \Delta_{13} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$ 时,得到误差分布矩阵:

$$\begin{bmatrix} b^2 Q_{\text{step}} \Delta_{13} / 8 & -b^2 Q_{\text{step}} \Delta_{13} / 4 & b^2 Q_{\text{step}} \Delta_{13} / 4 & -b^2 Q_{\text{step}} \Delta_{13} / 8 \\ b^2 Q_{\text{step}} \Delta_{13} / 16 & -b^2 Q_{\text{step}} \Delta_{13} / 8 & b^2 Q_{\text{step}} \Delta_{13} / 8 & -b^2 Q_{\text{step}} \Delta_{13} / 16 \\ -b^2 Q_{\text{step}} \Delta_{13} / 16 & b^2 Q_{\text{step}} \Delta_{13} / 8 & -b^2 Q_{\text{step}} \Delta_{13} / 8 & b^2 Q_{\text{step}} \Delta_{13} / 16 \\ -b^2 Q_{\text{step}} \Delta_{13} / 8 & b^2 Q_{\text{step}} \Delta_{13} / 4 & -b^2 Q_{\text{step}} \Delta_{13} / 4 & b^2 Q_{\text{step}} \Delta_{13} / 8 \end{bmatrix} \quad (3)$$

进而对各位置点的嵌入 $\Delta_{x,y}$ 做矩阵扩散运算, 归纳发现, 漂移误差分布矩阵位于宏块内的最后一行和最后一列的分布具有统一近似的规律, 仅有四种. 若令 $t = b^2 Q_{\text{step}} \Delta_{13} / 4$, 可表示为 $t [1 \ 1 \ 1 \ 1]$ 、 $t [1 \ 1/2 \ -1/2 \ 1]$ 、 $t [1 \ -1 \ -1 \ 1]$ 、 $t [1/2 \ -1 \ 1 \ -1/2]$, 依次标号 0、1、2、3. 且嵌入位置的行号 i 决定最后一列的分布规律, 列号 j 决定最后一行的分布规律. 例如 $j=2$, 扩散后误差矩阵最后一行的分布为标号为 2 的 $[1 \ -1 \ -1 \ 1]$.

上述分析推导表明, 变换域嵌入的微小误差 Δ_{13} , 经 H.264 解码重构, 扩散至空域的每个元素中. 而帧内预测又将误差持续传播至后续宏块, 进而可能会不断影响至整个 I 帧、P 帧、B 帧, 破坏视频质量及秘密信息的隐蔽性.

但实际过程会有更灵活的余地. 例如, 假设当前宏块采用预测模式 3, 且仅上方宏块存在嵌入误差 Δ_{13} , 经 H.264 帧内预测函数变换, 传递至本宏块内各位置的误差扩散为:

$$\begin{aligned} \Delta_a &= f(\Delta_A) + f(\Delta_B) + \dots + f(\Delta_Q) \\ &= f(\Delta_A) + 2f(\Delta_B) + f(\Delta_C) \\ &= b^2 Q_{\text{step}} \Delta_{13} / 8 \end{aligned} \quad (4)$$

同理, $\Delta_b = \Delta_c = -b^2 Q_{\text{step}} \Delta_{13} / 8$, $\Delta_d = \Delta_g = \Delta_j = b^2 Q_{\text{step}} \Delta_{13} / 8$, $\Delta_e = \Delta_f = 0$.

此外还可以得到在模式 2、模式 5、模式 6 下的误差传播. 如图 2 所示, 失真漂移仅产生于阴影部分(图中的同一种阴影表示相同的误差值).

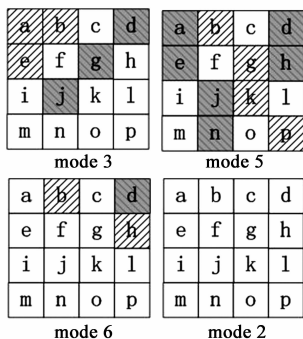


图2 在各预测模式下误差传播的分布点(阴影小块)

其中, mode2 中, Δ_{13} 产生的误差漂移内部相消, 停止传播, mode6 中的漂移不会传播到本宏块的最后一行, 从而不会传播至其下方宏块. mode3 中对漂移敏感的误差位置只有像素 d , 因此可以看出漂移传播是有限的, 不会引起视频质量的明显破坏.

另一方面, 文献[6~12]中为避免误差继续传播, 以误差补偿或对系数的方式抵消漂移敏感位置的误差, 但这样做造成宏块的其它位置成倍积聚误差. 令 $t \in$

$\{-1, 0, 1\}$, $p \in \{a^2, ab, b^2\}$, $C = tpQ_{\text{step}}$, 则误差积聚可表示成如下三种形式:

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2C & 2C & 2C & 2C \\ 2C & 2C & 2C & 2C \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 2C & 2C & 0 \\ 0 & 2C & 2C & 0 \\ 0 & 2C & 2C & 0 \\ 0 & 2C & 2C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 4C & 4C & 0 \\ 0 & 4C & 4C & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

以 PSNR 为定量衡量

$$PSNR = -10 \times \lg \left\{ \frac{1}{255^2 MN} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [d(m, n)]^2 \right\} \quad (6)$$

以式(5)中第一个矩阵分布为例, $d(m, n)$ 表示点 (m, n) 处的原始视频数据与嵌入后的差值. 可见, $n=1$ 或 2 时, 误差成倍累积, $d(m, n) = 2C$, 平方后整体误差增大, PSNR 降低:

$$\Delta_{PSNR} \approx -10 \times \lg 2 \approx -3 \text{ db} \quad (7)$$

另外, 由于误差有规律地积累, 将影响预测方向的变化. 一旦因此预测模式发生变化, 会引起更多位置的误差. 如此表明, 误差补偿和“对系数”等的嵌入方法, 在增大隐写容量的情况下, 是经不起视频播放、压缩解压缩攻击等网络传播处理的.

3 漂移深度控制策略的构架

3.1 漂移深度的分级处理

由上文推导的有限漂移传播规律, 引导出漂移深度控制的处理策略, 将失真漂移的传播范围与视频隐写质量相关联. 既可以有效控制漂移传播, 保证视频质量和视频隐写的安全性, 又进一步在不同分级中增大可隐写位置, 以扩展隐写的灵活性和容量.

根据误差扩散的范围做出如下定义: 将误差限制在当前像素块以内的漂移深度为 0 级; 将误差有效控制仅在传播至位于当前块右方、左下方、下方、右下方的像素块中任意一个时, 漂移深度为 1 级; 扩散范围每增大一圈, 以此类推, 漂移深度增大一级. 级数越大, 说明误差漂移越严重, 视频质量逐级降低.

3.2 漂移深度为 0 的隐写策略

图 2 表明, 对于每一级漂移, 由于失真传播的有限性, 可以扩展出更多的可用于隐写的情况. 设置漂移深度 DL(drift level) = 0, 即: 将失真漂移控制在本宏块内, 误差不会继续向四周宏块传播. 可以得出三种可用于隐写的情况.

3.2.1 预测方向相反, 不产生漂移

若当前宏块的预测方向与相邻块之间位置方向相反, 则后续编码块的预测不会用到当前宏块中的含误差像素值. 具体而言, 当各个亮度快的预测模式编号同时满足如下条件时, 不产生漂移:

$$(1) m - B_R = 0, 3, 7;$$

$$(2) m - B_{LD} = 0, 1, 2, 4, 5, 6, 8;$$

(3) $m_B_D = 1, 8$;

(4) $m_B_{RD} = 0, 1, 2, 3, 7, 8$.

3.2.2 误差漂移自消除

图 2 表明,当 $m_B_{curr} = 2$, 秘密信息 Δ_{ij} 的嵌入位置满足 $i \neq 0$ 且 $j \neq 0$ 时, 则扩散至最后一行或最后一列的误差分布只可能为 $[1 \ 1/2 \ -1/2 \ 1]$ 、 $[1 \ -1 \ -1 \ 1]$ 、 $[1/2 \ -1 \ 1 \ -1/2]$. 这三种分布在模式 2 下失真漂移一定会自消除.

统计视频序列 BUS、CITY、FOREMAN、CREW、HARBOUR、MOBILE 中的 1 帧, 如图 3 所示. 预测模式 2 的宏块占总数的 20% 左右, 证实自相消可提供更多可隐写宏块. 图 3 中第二幅统计数据表明, 将采用本文算法后可隐写数据与采用文献[11]中算法的可隐写数据量对比, 所有帧的隐写容量增大了 10% 左右. 1 帧中采用模式 2 的宏块数目比例越高, 隐写容量增幅相对越大; 而比例较低的, 如帧序号 7、8, 隐写容量增大的比率相对较小.

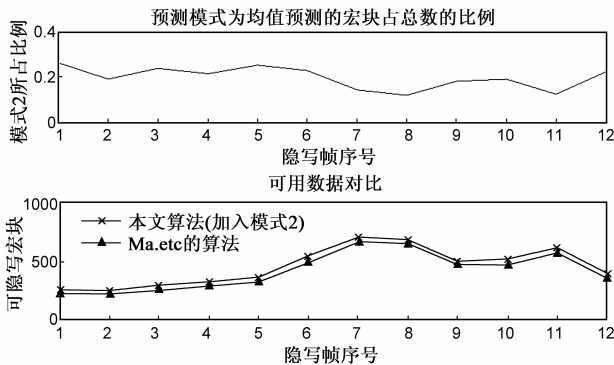


图 3 模式 2 (均值预测) 下漂移自相消的隐写容量增长对比

3.2.3 嵌入数据的误差相互补偿消除

若任意位置及数目的信息嵌入 Δ_{ij} , 在敏感位置引起的误差累积, 相消为零, 就可以避免漂移传播至后续宏块.

由 2.2 节做进一步推导, 符合如下条件的位置, 根据不同的预测误差避免数据要求, 做对应的嵌入操作, 均可实现误差补偿相消:

$$C_{i, x_1} C_{j, y_1} \Delta_{x_1, y_1} + C_{i, x_2} C_{j, y_2} \Delta_{x_2, y_2} = 0 \quad (8)$$

其中, $i, j = 0, 1, 2, 3$. 进一步可以扩展为多组数据相消, 有

$$\sum_{k=1}^m C_{i, x_k} C_{j, y_k} \Delta_{x_k, y_k} = 0 \quad (9)$$

若嵌入操作简化处理, 认为 $\Delta_{x_1, y_1}, \Delta_{x_2, y_2}$ 为 -1 或 1 , 即加减 1 嵌入, 则上式表达为

$$C_{i, x_1} C_{j, y_1} \pm C_{i, x_2} C_{j, y_2} = 0 \quad (10)$$

($i, j = 0, 1, 2, 3$)

这里误差相消的选择范围, 不再仅仅局限于 Ma 等

人的“+1、-1”对系数消除方案中列出的几组特定系数对. 下面例举几类新增的典型情况:

(1) ± 1 在比特编码中效果相同, 均为 0、1 反转, 在“+1、-1”的对系数基础上, 增加“+1、+1”和“-1、-1”的情况.

(2) 嵌入后产生同一种分布的系数位置, 只要令其系数值互成反比例, 即可作为可选择的隐写位置. 例如: $\Delta_{1,3} = 2, \Delta_{3,3} = -1$.

另外, 因 $\Delta_{i,j} = 2$ 涉及的是次低有效位的比特反转变化, 等同于引入最低和次低有效位的双层嵌入. 将嵌入率由“对系数”算法的修改 2 比特传递 1 比特信息, 提升为修改 3 比特传递 2 比特信息, 综合效率及安全性均得到优化.

改进后的嵌入误差补偿方法下, 隐写容量较文献[11]的方案增大的比例, 理论上可达 30% 以上. 而实际可隐写系数数量增大了 5% 左右. 理论与实际相差较大的原因是, H.264/AVC 高效编码使得码流中多为拖尾系数 0、1, 对这些数据展开隐写会引起较明显的码率变化, 容易遭到压缩攻击. 这个现象大大限制了可选取的隐写元素集, 隐写容量的提升空间有限. 尽管如此, 实验证明, 改进后隐写的灵活性和容量的确得到了大幅增强.

3.3 漂移深度为 1 的隐写策略

本节给出漂移深度为 1 的隐写策略. 设置漂移深度 $DL = 1$, 即: 允许漂移扩散传播一次, 并自动在本级传播中停止. 本节中对与 $DL = 0$ 原理一致时的情况不再赘述.

2.2 节推导表明, 误差扩散在像素块内最后一行和最后一列, 遵循四种分布. 且 H.264 编码标准中各种预测模式下的预测像素计算具有统一的规律^[1]: 亮度块内各像素的预测值仅取决于沿预测方向和该像素位置在同一直线上的相关位置点. 例如: 预测模式 6 下像素 d 的预测值仅与上方像素块最后一行的 A、B、C 有关. 因此各种预测模式下, 各点的预测值仅遵循两类计算方式, 即: $s_{x,3} + s_{x+1,3}$ 或 $s_{x,3} + 2s_{x+1,3} + s_{x+2,3} (s_{3,y} + s_{3,y+1}$ 或 $s_{3,y} + 2s_{3,y+1} + s_{3,y+2})$.

有限的误差分布经过固定的两类计算方式, 在特定点的误差累积一定会呈现有限的规律. 因此, 可通过调整比例和方向实现自动抵消, 限制传播.

例如, 当前宏块采用预测模式 6, 预测方向位于对角线预测的上方, 且仅其上方宏块的最后一行像素包含误差, 如图 4 所示. 此时, 其上方宏块的误差仅能传播至当前宏块, 而位于当前宏块下方的后续编码块因不在其持续传播方向上, 不再受到误差漂移的影响, 误差传播的深度有限. 如果此时其右侧像素块的预测模式

为 0,3,7, 误差漂移的传递将完全在本级停止了。

统计得出, 当宏块间位置及预测方向具备如图 4 所示特征的关系时, 即当误差和当前宏块预测方向在对角线方向的同一侧, 且宏块之间的相对位置及四周宏块所用到的预测方向在对角线另一侧时, 漂移经一级传播后立即停止。

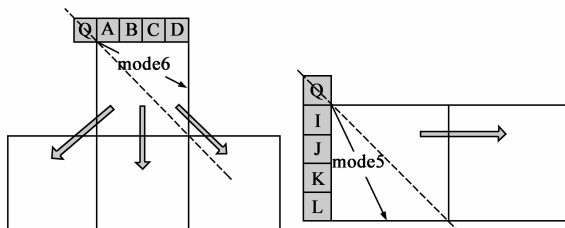


图4 误差传播方向与亮度块位置关系

表 1 列出的是漂移深度为 1 时, 可扩展的可隐写情况。为使得误差传播在本级停止, 表中列出了 B_{LD} 、 B_D 、 B_R 、 B_{RD} 以及 $B_{current}$ 所遵循的预测模式可选范围。

表 1 漂移深度为 1 时增加的可隐写情况

序号	误差位置	$m - B_{cur}$	$m - B_{LD}$	$m - B_D$	$m - B_{RD}$	$m - B_R$
(a)	上方	4,6	除模式 3 以外	1,6,8	除 4,5,6 外	0,3,7
(b)	上方/左上方	6	全部	全部	全部	0,3,7
(c)	左方	4,5	除模式 3,7 外	1,8	除 4,5,6 外	0,3,5,7
(d)	左方/左上方	5	除模式 3,7 外	1,8	全部	全部

3.4 多级漂移与视频隐写质量控制

实验表明, 随着漂移深度级数的增大, 限制条件越来越多, 进一步增加的可隐写位置也越来越少, 视频质量的下降趋势却越来越明显。多级漂移与视频隐写质量、视频隐写容量的关系如图 5 所示。

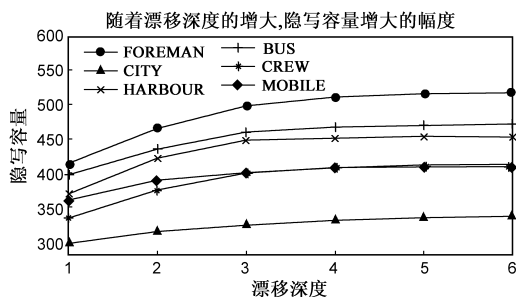


图5 不同漂移深度的隐写容量趋势

每增加一级漂移, 新增的情况越来越少, 漂移深度与隐写容量的增长关系大致逐步呈现趋于饱和。牺牲多大程度的视频质量来获取容量上多大的增幅, 成为应用中的主要权衡。因此, 对于安全性要求较高的水印, 选择漂移深度为 0 的隐写策略; 对于要求大容量隐写数据传输的情况, 选择漂移深度为 1 的隐写策略, 是对视频质量、安全性和容量的较好折中。

3.5 隐写算法

3.5.1 嵌入步骤

基于漂移深度控制策略, 设计隐写算法, 分为两部分, 具体步骤如下:

(1) 可隐写元素集的选取:

Step1 确定应用场景, 确定漂移深度 DL 。

Step2 按照 3.2 列举的三种情况, 选取满足的可隐写元素集; 若漂移深度为 0, 则结束位置筛选, 转入 Step5, 若漂移深度为 1, 则继续 Step3;

Step3 按照 3.3 所述的情况, 选取满足的可隐写元素集; 若漂移深度为 1, 则结束位置筛选, 转入 Step5, 若漂移深度大于 1, 则继续 Step4;

Step4 按照 3.4 所述的方法, 权衡视频质量、安全性和隐写容量。

Step5 筛选出的可隐写元素集, 形成隐写载体流。

(2) 隐写编码

Step6 将秘密信息使用共享密钥 Key 置乱, 得到随机比特流 m 。

Step7 确定编码转移矩阵 H , 通过湿纸编码^[13]将秘密信息写入隐写载体流, 重新编码写入原始视频流, 完成隐写, 形成含密视频流 y , 用于隐蔽信息传输。

3.5.2 提取步骤

提取的过程是嵌入的反向过程, 确定含密载体流后, 由共享的编码转移矩阵 H 和载密视频数据 y , 通过 $Hy = m$, 就可以得到秘密信息加密后的比特流, 由密钥 Key 解密获取秘密信息。由于湿纸编码过程无需传递原始载体, 实现了盲提取。

4 实验结果和分析

4.1 实验参数设置

本文算法应用于 JM86 软件平台, 选取标准测试视频 BUS、CITY、CREW、FOOTBALL、FOREMAN、HARBOUR、MOBILE、SOCCER, 采用 CIF 及 QCIF 格式。来源于视频库: <ftp://ftp.tnt.uni-hannover.de/pub/svc/testsequences/>。

4.2 实验结果和分析

4.2.1 嵌入效率

分别选取各视频的第 10 帧, 衡量本文提出的算法性能。以 FOREMAN 为例, 图 6(a) 是视频原始帧, 图 6(b) 是嵌入后的含密视频帧。从视觉上, 两幅图几乎看不出区别。

理论可隐写容量是单个嵌入时的结果。如同时嵌入多个时, 应考虑到累积效应以及载体系数的范围。必须在不同的质量要求下, 设置门限阈值。

参照文献[7~12], 本文设置隐写阈值 $Y_{00} > 1$, 对比误差补偿算法^[9]、对系数算法^[11]和本文算法的综合性。通过比较比特率变化、隐写容量和 $PSNR$ 三项指标,



图6 信息嵌入前后的视觉效果对比

综合衡量隐写性能.如表 2 所示.

表 2 算法性能综合比较

视频序列名	性能指标	误差补偿算法 (文献[9])	对系数算法 (文献[11])	本文算法
BUS	容量	177	203	247
	PSNR	39.3	42.7	41.2
	比特率增长	4.62	3.16	3.64
CITY	容量	306	227	309
	PSNR	34.2	41.1	42.2
	比特率增长	2.17	1.88	0.68
CREW	容量	184	234	250
	PSNR	36.7	38.6	39.6
	比特率增长	4.53	7.07	2.49
FOOTBALL	容量	182	201	253
	PSNR	39.6	39.9	39.6
	比特率增长	2.22	1.83	1.85
FOREMAN	容量	171	194	235
	PSNR	38.6	41.3	41.9
	比特率增长	1.85	1.63	1.34
HARBOUR	容量	206	202	275
	PSNR	39.4	42.01	39.6
	比特率增长	2.58	1.08	1.92
MOBILE	容量	198	194	261
	PSNR	39.0	41.1	41.0
	比特率增长	2.45	1.55	1.79
SOCCER	容量	291	313	378
	PSNR	38.9	39.1	39.3
	比特率增长	2.60	2.31	2.14

作为定量衡量视频隐写质量及隐蔽性的指标, $PSNR > 38\text{dB}$ 时人眼不能察觉^[14]. 在 $Y_{00} > 1$ 的阈值限制下,表 2 的数据证明本文算法符合视觉隐蔽性要求.且比特率增长都保持在 3% 以下,不会引起攻击检测者的怀疑.在同等安全性要求下,本文算法下的隐写容量增大了约 15% 以上,视频质量、比特率等性能相对提

升.

4.2.2 抗攻击性实验

表 3 中实验数据为秘密信息经各类干扰攻击后的提取准确度.实验中主要采用的干扰源是椒盐噪声、高斯噪声、均值滤波.NC(Normalized Correlation)是原始数据流与提取后的数据流之间的相似度度量,恢复率指秘密信息的可恢复可读取程度.本文算法对于均值滤波的保持性较噪声干扰略低.经加噪等模拟干扰后,提取出的秘密信息的准确率仍保持在 80% 以上.实验结果表明,在一定的误差允许范围内,隐写传输抗攻击能力较强,满足秘密信息传输的安全性要求.

表 3 不同攻击下的性能

视频序列名	椒盐噪声		高斯噪声		循环均值滤波	
	恢复率	NC	恢复率	NC	恢复率	NC
MOBILE	78%	0.87	87%	0.93	75%	0.81
FOREMAN	85%	0.95	91%	0.97	76%	0.82
BUS	79%	0.87	83%	0.89	79%	0.87
CITY	86%	0.93	92%	0.97	79%	0.86

5 结束语

视频信息隐藏是集多学科理论与技术于一身的新兴技术领域.特别是在基于 H.264/AVC 的视频压缩域实现信息隐写,有很大的前瞻性与技术难度.本文在总结分析已有各类隐写方案的基础上,立足工程实践,深入理论,对预测漂移问题进行详细逻辑推演,找出失真漂移的传播规律与质量控制的关系,挖掘更多可隐写位置.提出了一种基于 H.264/AVC 的高效视频隐写新算法.通过详细的理论推导与仿真实验,验证了该算法的可行性和先进性.

参考文献

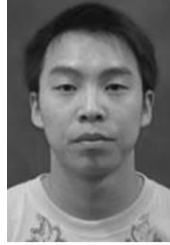
- [1] Wiegand T, et al. Overview of the H.264/AVC video coding standard [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2003, 13(7): 560 - 576.
- [2] Al-Frajat A, et al. Hiding data in video file: An overview [J]. Journal of Applied Sciences, 2010, 10(15): 1644 - 1649.
- [3] 邵亚非,等.数字视频广播中的压缩域水印算法[J].电子学报, 2003, 31(10): 1562 - 1564.
Shao Yafei, et al. Compressed domain watermarking algorithm in digital video broadcasting [J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(10): 1562 - 1564. (in Chinese)
- [4] Kim D W, et al. The problems in digital watermarking into intra-frames of H.264/AVC [J]. Image and Vision Computing, 2010, 28(8): 1220 - 1228.
- [5] 胡洋,张春田,苏育挺.基于 H.264/AVC 的视频信息隐藏算法[J].电子学报, 2008, 36(4): 690 - 694.

- Hu Yang, Zhang Chuntian, Su Yuting. Information hiding for H.264/AVC [J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(4): 690 – 694. (in Chinese)
- [6] Mansouri A, 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.
- [7] X Gong, H Lu. Towards fast and robust watermarking scheme for H.264 video [A]. Proceedings of 10th IEEE International Symposium Multimedia [C]. USA: IEEE Press, 2008. 649 – 653.
- [8] L Zhang, Y Zhu, L M Po. A novel watermarking scheme with compensation in bit-stream domain for H.264/AVC [A]. Proceedings of IEEE ICASSP [C]. Dallas, TX: IEEE, 2010. 1758 – 1761.
- [9] Huo W, Y Zhu, H Chen. A controllable error-drift elimination scheme for watermarking algorithm in H.264/AVC stream [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2011, 18(9): 535 – 538.
- [10] Yunxia Liu, Z L, Xiaojing Ma. Reversible data hiding scheme based on H.264 AVC without distortion drift [J]. Journal of Software, 2012, 7(5): 1057 – 1064.
- [11] Lin T J, et al. An improved DCT-based perturbation scheme for high capacity data hiding in H.264/AVC intra frames [J]. Journal of Systems and Software, 2012, 922 (10): 2 – 33.
- [12] Xiaojing Ma, Z L, Hao Tu, Bochao Zhang. A data hiding algorithm for H.264 AVC video streams without intra-frame distortion drift [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2010, 20(10): 1320 – 1330.
- [13] Augot D, Barbier M, Fontaine C. Ensuring message embedding in wet paper steganography [J]. Cryptography and Coding, 2011, 7089: 244 – 258.
- [14] Petitcolas FAP, Anderson RJ. Evaluation of copyright marking system [A]. Multimedia Systems [C]. Italy: IEEE, 1999. 574 – 579.

作者简介



尤 星 女, 1986 年 6 月 出生, 江苏南京人. 2008 年本科毕业于东南大学吴健雄学院信息工程专业, 2013 年博士毕业于中国科学院大学, 主要研究方向为信息隐藏及视频信号处理.
E-mail: livial38567@126.com



谢东峰 男, 1987 年 7 月 出生, 湖北红安人. 2009 年毕业于武汉大学电子科技专业. 现为中国科学院大学硕博连读生, 从事信号处理及网络规划有关研究.
E-mail: dfhsie@gmail.com