



计算机科学

COMPUTER SCIENCE

基于PU分割模式和运动向量的HEVC信息隐藏算法

殷和民, 张英男, 李军, 张严哲

引用本文

殷和民, 张英男, 李军, 张严哲. 基于PU分割模式和运动向量的HEVC信息隐藏算法[J]. 计算机科学, 2026, 53(5): 446-452.

YIN Hemin, ZHANG Yingnan, LI Jun, ZHANG Yanzhe. HEVC Information Hiding Algorithm Based on PU Partition Modes and Motion Vectors [J]. Computer Science, 2026, 53(5): 446-452.

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)

[基于像素区间划分及预测恢复的完全加密图像可逆信息隐藏](#)

Reversible Data Hiding in Fully Encrypted Images Based on Pixel Interval Partitioning and Prediction Recovery

计算机科学, 2025, 52(6A): 240900030-8. <https://doi.org/10.11896/jsjx.240900030>

[电力系统网络通信安全中的高载荷信息隐藏算法研究](#)

Study on High Payload Data Hiding Algorithm in Power System Network Communication Security

计算机科学, 2025, 52(6A): 240600024-8. <https://doi.org/10.11896/jsjx.240600024>

[基于自适应MSB可逆信息隐藏的图像云数据密文安全去重机制](#)

Adaptive MSB Reversible Data Hiding Based Security Deduplication for Encrypted Images in Cloud Storage

计算机科学, 2024, 51(12): 352-360. <https://doi.org/10.11896/jsjx.231100087>

[基于YOLOv5的桥梁裂纹检测方法研究](#)

Study on Detection Method of Bridge Crack Based on YOLOv5

计算机科学, 2024, 51(11A): 231200063-7. <https://doi.org/10.11896/jsjx.231200063>

[基于侧信道特征的IPSec VPN闭合性检测方法](#)

IPSec VPN Closure Detection Method Based on Side-channel Features

计算机科学, 2023, 50(10): 308-314. <https://doi.org/10.11896/jsjx.230500141>

基于 PU 分割模式和运动向量的 HEVC 信息隐藏算法

殷和民¹ 张英男^{1,2,3} 李 军^{1,2} 张严哲¹

1 武警工程大学密码工程学院 西安 710086

2 武警部队网络与信息安全重点实验室 西安 710086

3 武警工程大学重点实验室 西安 710086

(yhm2571@163.com)

摘要 互联网平台上视频用户日益增多,高效视频编码(High Efficiency Video Coding, HEVC)标准广泛应用,结合 HEVC 标准的隐写术和隐写分析不断发展。为提高嵌入的安全性,提出了一种利用预测单元(Prediction Unit, PU)分割模式和运动向量(Motion Vector, MV)嵌入信息的算法,多种载体元素有助于分散嵌入扰动,拓展嵌入空间。PU 分割模式域按照 PU 分割模式数量结构定义二进制映射规则,隐写视频能够保持固有的 PU 分割模式分布规律;运动向量域预选修改后仍具备 MV 局部最优性的运动向量差(Motion Vector Difference, MVD)作载体。两个域都使用校验网格码(Syndrome Trellis Codes, STC)自适应寻找嵌入扰动最小的路径。实验结果表明,所提算法能保持良好的视频质量,隐写分析抵抗能力强,嵌入容量理想。

关键词: 信息隐藏; 高效视频编码; PU 分割模式; 运动向量; 校验网格码

中图分类号 TP391

HEVC Information Hiding Algorithm Based on PU Partition Modes and Motion Vectors

YIN Hemin¹, ZHANG Yingnan^{1,2,3}, LI Jun^{1,2} and ZHANG Yanzhe¹

1 College of Cryptography Engineering, Engineering University of PAP, Xi'an 710086, China

2 Key Laboratory of Network and Information Security of PAP, Xi'an 710086, China

3 Key Laboratory of CTC&IE, Engineering University of PAP, Xi'an 710086, China

Abstract With the increasing number of video users on Internet platforms, the high efficiency video coding(HEVC) standard is widely applied, steganography and steganalysis techniques based on the HEVC standard continue to develop. To enhance embedding security, this paper proposes an algorithm that utilizes prediction unit(PU) partition modes and motion vectors(MV) as carriers, dispersing embedding perturbation features while expanding the available embedding space. The PU partition mode domain defines binary mapping rules according to the quantitative structure inherent in the PU partition modes themselves, while the distortion function takes into account cumulative inter-frame errors, allowing the stego video to maintain the intrinsic distribution pattern of PU partition modes. In the motion vector domain, motion vector differences(MVD) that retain local optimality after pre-selected serve as carriers, with the distortion function considering both video quality and coding cost. Both domains employ syndrome trellis codes(STC) to adaptively find paths that minimise embedding disturbances. Experimental results demonstrate that the proposed algorithm maintains high video quality, exhibits strong resistance to steganalysis, and achieves an ideal embedding capacity.

Keywords Information hiding, High efficiency video coding(HEVC), PU partition mode, Motion vector, Syndrome trellis code (STC)

1 引言

随着计算机算力的提升以及人工智能的普及,信息处理越发便捷、高效。与此同时,信息安全问题日益突出,窃取、篡改、破坏等恶意行为时有发生,这迫使人们寻找更安全的信息保护手段。作为信息安全的重要分支,信息隐藏可追溯到

古代,古希腊将领把秘密信息写在奴隶头皮上,割发后才能读取信息,其核心思想是隐蔽地进行信息传递。现代信息隐藏常用来保护通信安全、认证数字作品的版权及内容,其载体是文本、图像和视频^[1-3]等。其中,视频载体具备独特优势:一方面,网络平台上视频用户多且视频存量,不易引起关注,隐蔽性好;另一方面,视频具备大量冗余,便于承载信息。在日

到稿日期:2025-11-10 返修日期:2025-12-13

基金项目:国家自然科学基金(62202496)

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China(62202496).

通信作者:张英男(zyn583@163.com)

常的视频存储和传递过程中,为了减小所需的空空间,大多对其进行编码处理。当下,流行的视频编码标准有 H. 264/AVC^[4], H. 265/HEVC^[5] 和 AVS^[6]。截至 2025 年,HEVC 标准占据约 1/3 的市场份额,并且呈上升趋势。研究与 HEVC 标准相结合的视频信息隐藏技术,具有突出的实用价值。

根据载体的不同,基于 HEVC 标准的信息隐藏算法大致可分成 3 类,分别是基于变换系数^[7-8]、基于帧内预测模式^[9-10],以及基于帧间预测模式。基于变换系数的算法由于较多的高频系数幅值很小,量化后这些系数舍入成 0,因此有效载体相对较少。基于帧内预测模式的算法只能通过 I 帧嵌入,但 I 帧的数量在视频序列中通常较少。基于帧间预测的算法通过 P 帧实现,由于常用编码结构中 P 帧远多于 I 帧,因此该类算法的可用载体多,嵌入方式丰富,备受关注。

帧间预测嵌入可以进一步分成两个域:PU 分割模式域和运动向量域。在 PU 分割模式域,Yang 等^[11]分析了不同分辨率下 PU 的分布,通过合理定义分割模式与秘密信息的映射关系,将 PU 分割模式分成 3 组实现嵌入。Liu 等^[12]结合菱形编码使 PU 分割模式可以携带更多的信息,并使用 $2N \times 2N$ 模式承载信息,提升了算法的嵌入容量。Li 等^[13]通过理论分析,推导出分割模式的替换对视频画质的影响较小,并提出了六元映射以提高算法的安全性。Yu 等^[14]把所有的 PU 分割模式都纳入载体序列,设计了多因素失真函数,在保持 PU 划分结构的条件下,提升了隐写容量。在运动向量域,Liu 等^[15]利用预测运动向量(Motion Vector Prediction, MVP)的索引嵌入信息,而后补偿运动向量,保持了视频质量不变。Li 等^[16]同时用预测运动向量索引和运动向量差值作为载体,提出了满足运动向量及预测运动向量局部最优的算法。

然而,Liu 等^[12]的算法在隐写后各 PU 分割模式的数量变化明显,尤其是 $2N \times 2N$ 模式,隐写分析抵抗能力弱;Li 等^[16]的算法安全性高,但可用载体有严格限制,嵌入容量较小。减少嵌入修改可以减轻扰动,提高隐写的安全性;增加嵌入修改有利于提升嵌入容量,但较多的修改会影响算法的安全性。为了取得隐写安全性和嵌入容量更好的平衡,研究者们尝试多载体元素隐写,拓展嵌入空间,分散修改造成的影响。Zhai 等^[17]提出了首个多域嵌入方法,使用子宏块分割模式和运动向量嵌入,他们设计的两种嵌入策略都展现了较好的隐写分析抵抗能力,嵌入造成的码率增长少。HEVC 标准下,Xing 等^[18]把帧内预测模式的奇偶性和变换单元的划分当成载体,在 I 帧选择特定区域嵌入以避免两个嵌入域相互影响,算法保持了良好的视觉质量和安全性,嵌入容量明显提升。

修改 PU 分割模式和运动向量的嵌入扰动小,本文利用视频编码器选择 PU 分割模式和运动向量顺序不一致的特点,提出了一种基于帧间预测的多域信息隐藏算法。嵌入先修改 PU 分割模式域,使用二进制映射规则保持 PU 分割模式的分布,用校验网格码^[19]寻找对视频质量和码率扰动小的嵌入路径;而后修改运动向量域,选择满足运动向量局部最优性的运动向量差作载体,以校验网格码自适应嵌入。

2 预备知识

2.1 选择 PU 分割模式

帧间预测过程中,每一帧会被划分成若干个编码树单元 CTU(Coding Tree Unit),其大小通常是 64×64 像素。视频编码器按照二叉树结构选择不同大小的编码单元 CU(Coding Unit), 64×64 大小的 CU 可以分成 4 个 32×32 大小的 CU, 32×32 大小的 CU 可以分成 4 个 16×16 大小的 CU,根据此方法,CU 最小为 8×8 像素。较大的 CU 会尝试 8 种不同的 PU 分割模式,分别是 $2N \times nU$, $2N \times nD$, $nL \times 2N$, $nR \times 2N$, $N \times N$, $2N \times 2N$, $2N \times N$ 和 $N \times 2N$,如图 1 所示。 8×8 大小的 CU 包含的像素少,只尝试 4 种对称的分割模式。灵活选用块大小和 PU 分割模式使得编码器可以在视频质量和编码所需代价间取得较好的平衡,提高压缩效率。

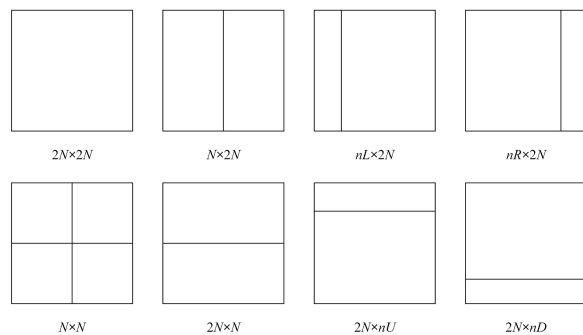


图 1 8 种 PU 分割模式

Fig. 1 8 types of PU partition modes

实际编码过程中,PU 分割模式的选择受到多种因素的影响,如视频分辨率、视频内容、编码参数等。图 2 统计了 5 个不同分辨率的测试视频在两种量化步长(Quantization Parameter, QP)下 50 帧的编码情况,记录所有 16×16 及 32×32 大小的 CU,跳过 8×8 和 64×64 大小的 CU。图 2(a)和图 2(b)的量化步长为 25,图 2(c)和图 2(d)的量化步长为 35。测试视频 coastguard, football 和 bridge 的分辨率是 352×288 , Basketball 和 RaceHorses 的分辨率是 832×480 。

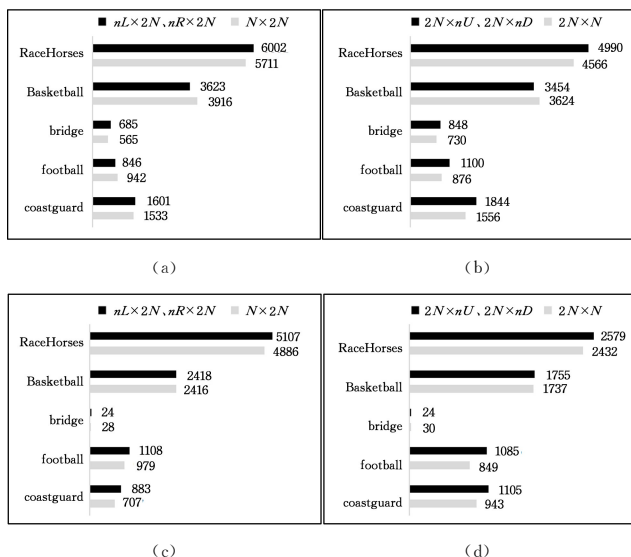


图 2 PU 分割模式的数量

Fig. 2 Number of PU partition modes

分割模式 $N \times 2N$, $nL \times 2N$ 和 $nR \times 2N$ 将一个 CU 划分成左右两部分。如图 2(a) 和图 2(c) 所示, 各测试视频中, 分割模式 $nL \times 2N$ 加上 $nR \times 2N$ 的数量与 $N \times 2N$ 的数量相近, 平均相差 8% 左右, 在测试序列 Basketball 和 RaceHorses 中, 它们的数量仅相差 5%。出现这种情况的原因是, 对称划分 ($N \times 2N$) 和非对称划分 ($nL \times 2N$, $nR \times 2N$) 共同覆盖了垂直方向的分割需求, 且自然图像内容及能量分布大体是趋于平衡的。此外, 视频编码器帧间预测过程中, 视频内容位移较大的部分与位移较小的部分在率失真选择上相互补偿, 影响着 PU 分割模式的选择。

同样地, 在水平方向划分上, 分割模式 $2N \times N$, $2N \times nU$ 和 $2N \times nD$ 也呈现出类似的规律, 如图 2(b) 和图 2(d) 所示。

2.2 计算运动向量

运动向量是一个二维矢量, 指示当前编码块到参考帧匹配块的位移, 其单位是像素。视频编码器用匹配块与当前块像素间的差值以及运动向量进行预测编码及重建原始图像, 这样可以有效减少表达视频所需的数据。HEVC 标准帧间预测的主要模式是合并 (Merge) 模式和高级运动向量预测 (Advanced Motion Vector Prediction, AMVP) 模式。Merge 模式直接复用邻近块的 MV, 适用于编码块位置变化小的区域。AMVP 模式在确定预测运动向量后, 还需进行运动搜索, 适用于块位置发生显著变化及纹理复杂的区域。

MVP 候选列表的值由参考块的 MV 填充, 视频编码器在 MVP 候选列表中筛选出预测运动向量。空域候选列表由同帧相邻块的 MV 填充, 可选相邻块位置如图 3(a) 所示, 左侧为 A_0 , 左下角为 A_1 , 上方为 B_1 , 右上角为 B_0 , 左上角为 B_2 。时域候选列表由参考帧同位块的 MV 填充, 其首选位置是 C_1 , 替补位置是 C_0 , 如图 3(b) 所示。

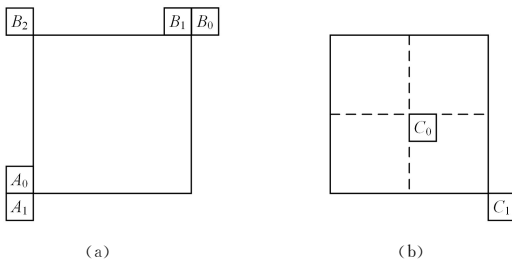


图 3 参考块位置

Fig. 3 Reference block position

Merge 模式建立候选列表时, 在空域候选列表中选择 4 个 MVP, 挑选顺序为 A_0 , B_1 , B_0 和 A_1 , 而 B_2 作为替补。这 4 个 MVP 与时域候选列表中选出的一个 MVP 合并到一起后, 视频编码器比较它们的率失真代价, 率失真代价最小的就是终选 MVP, 终选 MVP 会被直接作为当前块的 MV。使用 MV 嵌入时, 不考虑修改 Merge 模式的 MV, 这会导致相同 MV 的值不一致。

AMVP 模式建立候选列表时, 从空域候选列表选出 2 个 MVP, 从时域候选列表选出 1 个 MVP, 去除值相同的 MVP, 最终保留 2 个 MVP。在这两个 MVP 中, 视频编码器选择率失真代价小的做运动搜索以求取 MV。

运动搜索以 MVP 为起点, 按照先整像素搜索后亚像素

搜索的顺序寻找与当前块误差最小的块。整像素搜索可分为全搜索算法和快速搜索算法。全搜索算法计算搜索窗内所有可能的位置, 复杂度较高。HEVC 通常采用快速搜索 TZSearch 算法, 该算法以 2 的整数次幂为步长, 在菱形范围内寻找整像素最优匹配点。亚像素搜索在整像素最优附近做半像素及 1/4 像素插值, 确定最终的 MV。视频编码器通过传输 MVP 的索引以及 MVD 的值表示 MV。

2.3 作用于帧间预测的隐写分析

隐写术与隐写分析相互博弈。隐写术想方设法地藏匿信息, 而隐写分析致力于发现隐写的蛛丝马迹, 总结并提取隐写特征, 找出隐藏的信息。为了提高隐写术的安全性, 关注隐写分析提取的扰动特征是必要的。

在 PU 分割模式域, Li 等^[20]认为隐写使得各种 PU 分割模式的数量发生变化, 他们对视频进行重压缩, 计算压缩前后各分割模式的数量差, 依照分割模式数量的变化率设计特征集。Huang 等^[21]发现, 把 PU 分割模式分成 3 组进行替换, 各组分割模式的数量隐写前后差别很大, 并依此设计了有效的隐写分析算法。Dai 等^[22]设计了隐写分析神经网络 (Prediction Unit Steganalysis Network, PUSN), 通过多尺度模块捕获不同大小的 HEVC 编码结构, 以 PU 分割模式的局部空间相关性和连续性为特征检测修改 PU 分割的隐写算法。针对 PU 分割模式的隐写分析方法聚焦于分割模式数量和结构的异常变化。

在 MV 域, Zhang 等^[23]提出了一个 36 维特征集, 把 MV 的率失真成本是否满足局部最优作为判断标准。他们认为视频编码器所选 MV 的率失真在局部范围内是最小值, MV 的修改会破坏这种特性。Liu 等^[24]为了检出 MV 值不变的隐写算法, 探究 MVP 候选列表的特点, 并依据编码器会在候选列表中选择编码代价最小的 MVP, 设计了 40 维特征集的隐写分析方法。Li 等^[25]认为修改 MV 会对 MVP 的最优性产生扰动, 他们以 MVP 的最优率设计了快速高效的一维检测算法。视频编码器严格控制编码成本, 其选择的 MVP 和 MV 在邻近范围内大多是最优值, 针对 MV 的隐写分析主要围绕此特征展开。

2.4 STC 编码

STC 是一种最小加性失真的隐写编码方法, 能够在保持总的扰动代价最小的条件下逼近理论上的嵌入极限。其设计思想借鉴了低密度奇偶校验码 (Low-Density Parity-Check Codes, LDPC) 和网格编码 (Trellis-Coded Quantization, TCQ), 用动态规划在网格中寻找最小代价嵌入路径, 修改代价由失真函数定义, 每一步嵌入操作对应一次状态转移。总嵌入失真如式(1)所示:

$$D = \sum_{i=1}^n \rho_i |C_i - S_i| \quad (1)$$

其中, ρ_i 为修改单个载体的失真代价, C_i 为原始载体元素, S_i 为嵌入后相应位置的元素。

STC 的嵌入和提取如式(2)和式(3)所示:

$$Emb_{STC}(\mathbf{C}, \mathbf{m}) = \arg \min D(\mathbf{C}, \mathbf{S}') = \mathbf{S} \quad (2)$$

$$Ext_{STC}(\mathbf{S}) = \mathbf{HS} = \mathbf{m} \quad (3)$$

其中, \mathbf{C} 是载体序列, \mathbf{m} 是秘密信息序列, \mathbf{S}' 是密信的陪集, \mathbf{S}

是隐写后生成的载密序列, \mathbf{H} 是收发双发共享的校验矩阵。

3 基于 PU 分割模式和 MV 的隐写算法

为确保隐写的安全性,选择载体时必须充分考虑 PU 分割模式的结构特性和 MV 的局部最优性。在帧间预测过程中,视频编码器先预选 PU 分割模式,再根据 PU 确定运动向量。编码器选定 PU 分割模式和运动向量后,用其他分割模式替换编码器选定的分割模式,像素的形状与值发生变化, MV 极易随之改变。但是,对 MV 的幅值做出轻微修改很难影响到已经选定的 PU 分割模式。嵌入时,先修改 PU 分割模式嵌入,再修改 MV 嵌入,避免两个域的嵌入相互影响。

3.1 PU 分割模式域

PU 分割模式域的载体是每一个 CU 的 PU 分割模式,改动大块 CU 容易引起像素值的大幅度变化,因此嵌入不修改 64×64 大小的 CU。在 16×16 和 32×32 大小的 CU 上,分割模式 $N \times 2N$ 与 $nL \times 2N$ 和 $nR \times 2N$ 之和数量相当, $2N \times N$ 与 $2N \times nU$ 和 $2N \times nD$ 之和数量相当,以二进制映射表征信息可以较好地维持这种分布。如图 4 所示,分割模式 $N \times 2N$, $nL \times 2N$ 和 $nR \times 2N$ 为同一组; $2N \times N$, $2N \times nU$ 和 $2N \times nD$ 为同一组; $N \times 2N$ 和 $2N \times N$ 对应二进制“1”; $nL \times 2N$, $nR \times 2N$, $2N \times nU$ 和 $2N \times nD$ 对应二进制“0”。

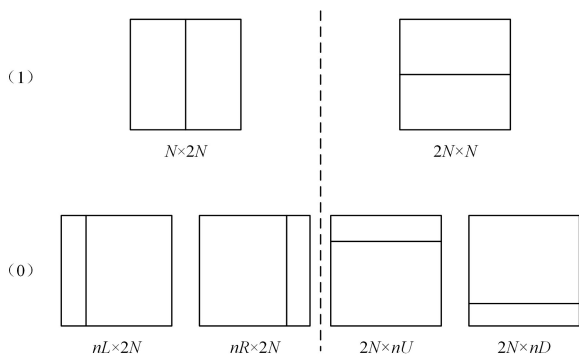


图 4 PU 分割模式的映射

Fig. 4 Mapping of PU partition modes

具体地,在 16×16 或 32×32 大小的 CU 上,若当前 PU 分割模式是 $N \times 2N$,该位置载体元素需要翻转时,分割模式可修改为 $nL \times 2N$ 或 $nR \times 2N$ 。若当前 PU 分割模式是 $nL \times 2N$ 或 $nR \times 2N$,该位置载体元素需要翻转时,只能将分割模式修改为 $N \times 2N$ 。在 8×8 大小的 CU 上,分割模式 $N \times 2N$ 和 $2N \times N$ 分别对应二进制数“1”和“0”,嵌入时相互替换。Yang 等^[1]证明了在 8×8 的 CU 上,水平分割模式与垂直分割模式替换所造成的扰动较小。

HEVC 视频编码器衡量编码代价的方式是比较率失真成本 J ,如式(4)所示:

$$J = D + \lambda R \quad (4)$$

其中,失真 D 表示编码视频与原始视频像素间的差异,通常用均方误差计算;码率 R 表示编码所用的比特数; λ 为拉格朗日乘子,可以灵活权衡视频质量与编码代价。

为了控制隐写视频的质量和编码成本,修改一个 PU 分割模式造成的变化由失真函数 P 计算,如式(5)所示:

$$P = |J_o - J_s| \quad (5)$$

其中, J_o 表示编码器选择的 PU 分割模式耗费的率失真, J_s 表示修改后的 PU 分割模式耗费的率失真。

He 等^[26]认为修改 PU 分割模式会带来码率的异常增加,前序帧的误差会影响到后序帧,编码误差在每一个图像组中累积。为了减小帧间累积的误差,失真函数 P 添加了帧位置控制因子 n ,如式(6)所示:

$$P = \frac{1}{n} |J_o - J_s| \quad (6)$$

当修改的帧比较靠前时,失真增大;修改的帧位置靠后时,失真减小。前述映射规则中,分割模式 $N \times 2N$ 可替换成 $nL \times 2N$ 或 $nR \times 2N$, $2N \times N$ 可替换成 $2N \times nU$ 或 $2N \times nD$ 。嵌入时选择两者中失真 P 较小的做替换,从而减少修改造成的扰动。

3.2 运动向量域

HEVC 视频编码器传递的是 MVP 索引和 MVD。MVP 索引指示选定的 MVP, MV 的值是 MVP 与 MVD 的加和,如式(7)所示。MV 域的隐写载体是其水平分量或者垂直分量,修改幅度为 1,通过修改 MVD 实现。

$$MVP + MVD = MV \quad (7)$$

映射规则为: MV 的水平分量与垂直分量之和转化成二进制后,其末位对应二进制数“0”或“1”。如图 5 所示,选中块的 MV 是(1,5),水平分量与垂直分量求和为 6,即二进制 110。若载密序列相应位置元素为“0”,MV 保持不变;若载密序列相应位置元素为“1”,需要修改 MV,该 MV 的可修改范围是(0,5),(2,5),(1,4)和(1,6)。



图 5 示例 MV

Fig. 5 Sample MV

失真函数 M 包含率失真 J_m 和局部最优成本 L 。 J_m 的计算式如式(8)所示:

$$J_m = |J_{m_o} - J_{m_s}| \quad (8)$$

其中, J_{m_o} 是修改前的率失真, J_{m_s} 是修改后所用率失真。若预选范围内存在修改后满足局部最优性的 MV,则 L 为 1;若预选范围内不存在这样的 MV,则 L 为无穷大。

M 的计算式如式(9)所示:

$$M = J_m + L \quad (9)$$

3.3 信息嵌入

嵌入应按序进行,先完成 PU 分割模式域的嵌入,再修改运动向量域,两个域各自独立。与之相对应,秘密信息需要被分成两部分,一部分用 PU 分割模式当载体,另一部分用运动向量当载体。由于 PU 分割模式域和运动向量域的可用载体数量受到视频内容和编码结构等因素的影响,嵌入时根据视频的实际承载能力划分秘密信息。

信息嵌入以帧为单位进行,对完整视频逐 P 帧处理。下面给出一帧的具体嵌入流程。

Step1 读取正常编码的一个 P 帧,按 CTU 及 CU 顺序记录 8×8 , 16×16 和 32×32 大小 CU 的 PU 分割模式及相关编码信息。

Step2 根据映射规则,按序将 PU 分割模式映射成二进制序列,即载体序列 C_P 。

Step3 依式(6)计算载体序列 C_P 每个元素的修改代价,标记载体元素“1”翻转为“0”时,PU 分割模式 $N \times 2N$ 或 $2N \times N$ 所选择的修改模式。

Step4 依式(2)求解载密序列 S_P 。对照载体序列 C_P 和载密序列 S_P ,元素不同处需要修改,修改按照载密序列映射的分割模式和标记替代原有分割模式。

Step5 读取已修改 PU 分割模式的同一帧,按编码顺序记录每一个 AMVP 模式 PU 的运动向量的相关信息。

Step6 按序将运动向量映射成载体序列 C_M 。

Step7 依式(9)计算失真代价,标记每一个元素翻转时,运动向量在加减 1 范围内选定的修改。

Step8 依式(2)求解载密序列 S_M 。在载密序列 S_M 和载体序列 C_M 元素不同的位置,按标记修改 AMVP 模式 PU 的运动向量。

Step9 完成帧间预测编码,进入后续编码流程,输出载密视频码流。

3.4 信息提取

提取信息时,同嵌入一样,先提取 PU 分割模式域嵌入的信息,再提取 MV 域嵌入的信息,逐 P 帧进行,最后拼接完整密信,具体流程如下。

Step1 读取载密视频的一个 P 帧,按编码顺序记录 8×8 , 16×16 和 32×32 大小 CU 的 PU 分割模式和 AMVP 模式 PU 的运动向量。

Step2 根据映射规则,按序将 PU 分割模式映射成二进制载密序列 S_P 。

Step3 结合收发双发共享的校验矩阵和载密序列 S_P 求解密信。

Step4 根据映射规则,按序将 AMVP 模式 PU 的运动向量映射成二进制载密序列 S_M 。

Step5 结合收发双发共享的校验矩阵和载密序列 S_M 求解密信。按 PU 分割模式域在前、MV 域在后的顺序,拼接完整密信。

4 实验与分析

为检验本文算法性能,实验从视觉质量、安全性和嵌入容量等方面进行测试和分析,本文算法在 HEVC 官方参考软件 HM16.26 上实现。测试视频序列是 3 种分辨率的 11 个标准视频,存储格式为未压缩的 yuv4:2:0 颜色空间,8 位颜色深度,如表 1 所列。测试视频编码 80 帧,帧率为 30。每个图像组包含 4 帧,结构为 IPPP。图 6 给出了不同分辨率测试视频随机位置编码 15 帧时 PU 分割模式域和运动向量域的载体情况,纵轴为该域可用载体数量,编码的量化步长为 30。由于 PU 分割模式域可用载体较多,密信被分成 60% 和 40% 两部分,前 60% 以 PU 分割模式为载体,后 40% 以运动向量为载体。

表 1 测试视频序列

Table 1 Test video sequence

分辨率	测试视频
352×288(A)	container, foreman, harbour, soccer, tempete
832×480(B)	Basketball, BQMall, PartyScene, RaceHorses
1280×720(C)	FourPeople, vidyo

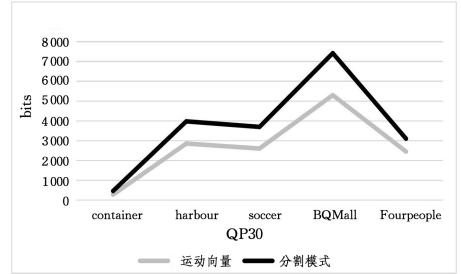


图 6 可用载体数量

Fig. 6 Number of available carriers

4.1 视觉质量分析

实验从主观和客观两个维度分析视频的视觉质量。主观层面要求人眼视觉系统难以察觉出视频隐藏了信息。客观上通过常用图像评价指标定量分析隐写的画质损失。

通过观察,肉眼难以区分原始视频和隐写视频。隐写后的视频不存在画面模糊和细节丢失情况,没有肉眼可见的马赛克、锯齿和伪影,能够达到原视频的视觉效果,具有较好的不可见性。图 7 为原视频与隐写视频一帧的对比图,从上至下分别取自测试视频 harbour, soccer 和 vidyo,左侧为原视频,右侧为隐写视频。

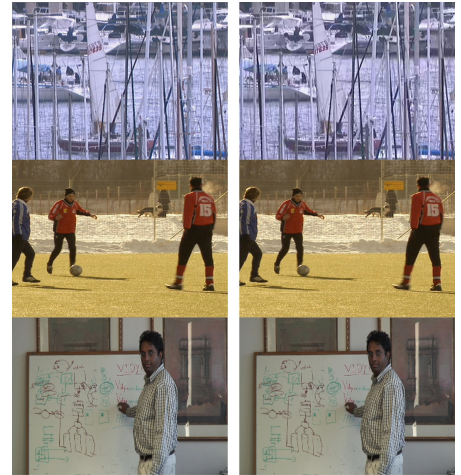


图 7 隐写视频

Fig. 7 Stego videos

峰值信噪比 (Peak Signal-to-Noise Ratio, PSNR) 是广泛使用的图像质量客观评价指标,用像素差值平方的平均值计算。如表 2 所列, $PSNR_0$ 是正常编码视频与未压缩视频比较的结果, $PSNR_S$ 是隐写视频与未压缩视频比较的结果。不同量化步长下,隐写视频的 $PSNR_S$ 与原视频的 $PSNR_0$ 的差值均小于 0.04,这说明隐写造成的像素扰动较小。

结构相似指数 (Structural Similarity Index, SSIM) 通过比较亮度、对比度和结构来衡量图像间的相似性,取值在 0 到 1 之间,当值为 1 时,对比图像完全一样。如表 2 所列,隐写视频的值都十分接近 1,且隐写后 $SSIM_S$ 与 $SSIM_0$ 差别小,均

不超过 0.0002,这说明隐写视频与原视频结构相似性高,视频质量保持较好。

表 2 隐写视频的客观质量

Table 2 Objective quality of stego videos

	QP	PSNR _O	PSNR _S	SSIM _O	SSIM _S	BRI/%
A	25	38.931	38.908	0.96231	0.96225	2.0
	35	36.013	35.984	0.94872	0.94863	1.6
B	25	37.774	37.735	0.94215	0.94207	2.1
	35	35.367	35.331	0.93727	0.93715	1.8
C	25	41.655	41.625	0.96509	0.96502	2.3
	35	38.211	38.176	0.95804	0.95795	1.9

比特率是每秒视频流包含的比特数。比特率的增长(Bit-Rate Increase, BRI)可以反映编码隐写视频比特数量的增加,如式(10)所示:

$$BRI = (BR_S - BR_O) / BR_O \quad (10)$$

其中, BR_O 是原视频的比特率, BR_S 是隐写视频的比特率。

本文算法受到改动最优 PU 分割模式以及预压缩的影响,比特率的增长平均为 1.9%,嵌入造成的额外编码成本小。

4.2 安全性分析

隐蔽性是隐写最本质的要求,实验通过 3 种针对性的隐写分析方法检验本文算法的安全性。隐写分类器为支持向量机(Support Vector Machine, SVM), Li 等^[20]的方法采用多项式核, Liu 等^[24]和 Zhai 等^[27]的方法采用高斯核。测试视频序列被划分成 4 帧的子序列,原视频与隐写视频组成 220 样本,按 4:1 分成数据集和测试集。隐写分析的准确率如表 3 所列,取 20 次数据集随机划分的平均值。嵌入率设置为 0.5,相较于 0.25 和 0.4 等较低嵌入率,高嵌入率的嵌入量大,隐写扰动相对明显,更能反映出算法对隐写分析的抵抗能力。

表 3 隐写分析的准确率

Table 3 Accuracy rate of steganalysis

隐写方法	QP(25)			QP(35)		
	本文算法	He 等 ^[26] 的方法	Li 等 ^[16] 的方法	本文算法	He 等 ^[26] 的方法	Li 等 ^[16] 的方法
Liu 等 ^[24] 的方法	0.53	—	0.61	0.52	—	0.55
Li 等 ^[20] 的方法	0.54	0.54	—	0.51	0.52	—
Zhai 等 ^[27] 的方法	0.52	0.53	0.57	0.50	0.50	0.52

Li 等^[20]根据隐写视频与重编码视频各 PU 分割模式的概率异常检出 PU 分割模式域的隐写算法。He 等^[26]使用校验网格码自适应嵌入,隐写分析难以检出。所提算法通过二进制映射维持了 PU 分割模式数量的平衡,并且用校验网格码寻找嵌入路径,具有较好的隐写分析抵抗能力。

Li 等^[24]通过 MV 及 MVP 的局部最优性检出 MV 域的隐写。Li 等^[16]同时用 MVP 索引和 MVD 作载体,对局部最优性的扰动较大。本文算法只修改 MVD,预选了修改后仍保持局部最优的 MV 作为载体,对该隐写分析具有抵抗能力。

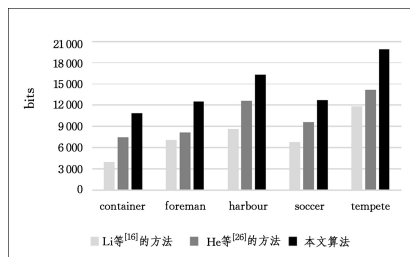
Zhai 等^[27]设计了通用的隐写分析方法,以 MV 的一致性为特征集,可检出基于 PU 分割模式或 MV 的隐写。所提算法的检出率在 50%左右,表现良好。

4.3 嵌入容量分析

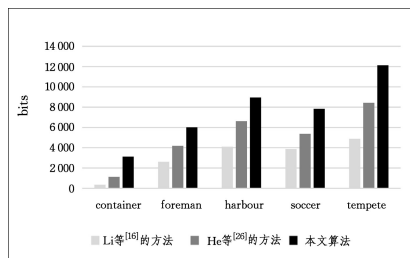
嵌入容量是衡量隐写算法性能的重要指标,无论是隐蔽通信或者用隐写存储信息,这些用途都蕴含着对信息量的要求。本文算法在 P 帧上嵌入,利用 AMVP 模式 PU 的运动向量和 PU 分割模式作为信息载体,充分占用视频编码的冗余空间。

如图 8 所示,在不同视频序列上,本文算法的嵌入容量都比较理想,平均比 Li 等^[16]的算法增加了约 110%,比 He 等^[26]的算法增加了约 37%。图 8(a)的量化步长为 25,图 8(b)的量化步长为 35。当视频内容在帧与帧间位置变化较大时,如测试视频 soccer 和 tempete, AMVP 模式的 PU 数量和 CU 数量相对较多,本文算法的可用载体多,嵌入容量提升显著。

值得注意的是,单语法元素作载体的嵌入方法可能会遇到视频内容或编码结构导致的嵌入空间不足,如图 8(b)的 container 序列,由于各帧画面相似度高,主体位移幅度小, Li 等的算法嵌入容量小。此情况下,本文算法由于使用多语法元素当载体,嵌入容量仍保持较好。



(a)



(b)

图 8 编码 30 帧的嵌入容量

Fig. 8 Embedding capacity for encoding 30 frames

结束语 本文基于 HEVC 标准帧间预测的编码特点,提出了一种多域嵌入的信息隐藏方法,首先修改 PU 分割模式,然后修改运动向量。嵌入充分考虑了隐写分析容易提取的特征,在 PU 分割模式域制定二进制映射规则,在 MV 域预选保持局部最优性的运动向量,通过校验网格码使得修改造成的总体失真最小化。实验结果表明,使用多个视频编码语法元素可以有效分散嵌入扰动,对具有针对性的隐写分析能保持较好的抵抗能力,算法安全性高。隐写算法在保持视频质量和安全性的同时,嵌入容量大,适用于各种内容、编码结构的视频。

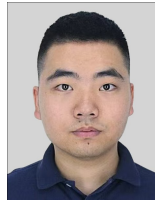
所提方法结合了 PU 分割模式和 MV 嵌入,但协同嵌入仅限于压缩域,未能充分挖掘视频的空域和频域特征。下一步,将探索更适配的嵌入载体以及更高效的协同嵌入机制,以期进一步提高算法性能,推动 HEVC 标准下秘密通信的发展。

参 考 文 献

- [1] MAJEED M A, SULAIMAN R, SHUKUR Z, et al. A review on text steganography techniques[J]. *Mathematics*, 2021, 9(21): 2829.
- [2] SUBRAMANIAN N, ELHARROUSS O, AL-MAADEED S, et al. Image steganography: A review of the recent advances[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 23409-23423.
- [3] KUNHOTH J, SUBRAMANIAN N, AL-MAADEED S, et al. Video steganography: recent advances and challenges[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2023, 82(27): 41943-41985.
- [4] WIEGAND T, SULLIVAN G J. The H. 264/AVC video coding standard [Standards in a Nutshell][J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2007, 24(2): 148-153.
- [5] SULLIVAN G J, OHM J R, HAN W J, et al. Overview of the High Efficiency Video Coding (HEVC) Standard [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2012, 22(12): 1649-1668.
- [6] FAN L, MA S W, WU F, et al. Overview of AVS video standard [C] // 2004 IEEE International Conference on Multimedia and Expo. 2005: 423-426.
- [7] LIU Y, LIU S, ZHAO H, et al. A new data hiding method for H. 265/HEVC video streams without intra-frame distortion drift[J]. *Multimedia Tools & Applications*, 2019, 78: 6459-6486.
- [8] ZHOU A, JIANG X, SUN T, et al. A HEVC steganography algorithm based on DCT/DST coefficients with BLB distortion model[C] // 2021 14th International Congress on Image and Signal Processing, BioMedical Engineering and Informatics. IEEE, 2021: 1-9.
- [9] DONG Y, JIANG X, LI Z, et al. Multi-channel HEVC steganography by minimizing IPM steganographic distortions[J]. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2022, 25: 2698-2709.
- [10] WANG J, YIN X, CHEN Y, et al. An adaptive IPM-based HEVC video steganography via minimizing non-additive distortion[J]. *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing*, 2022, 20(4): 2896-2912.
- [11] YANG Y, LI Z, XIE W, et al. High capacity and multilevel information hiding algorithm based on pu partition modes for HEVC videos[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2019, 78(7): 8423-8446.
- [12] LIU J, LI Z, JIANG X, et al. A high-performance CNN-applied HEVC steganography based on diamond-coded PU partition modes[J]. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2021, 24: 2084-2097.
- [13] LI Z, JIANG X, DONG Y, et al. An anti-steganalysis HEVC video steganography with high performance based on CNN and PU partition modes[J]. *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing*, 2022, 20(1): 606-619.
- [14] YU L, YU Z, WENG S, et al. Adaptive PUPM-based HEVC Video Steganography Balancing Embedding Performance and Security[J]. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2025, 27: 4508-4519.
- [15] LIU S, LIU B, HU Y, et al. Non-degraded adaptive HEVC steganography by advanced motion vector prediction[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2021, 28: 1843-1847.
- [16] LI J, ZHANG M, NIU K, et al. High-security HEVC video steganography method using the motion vector prediction index and motion vector difference[J]. *Tsinghua Science and Technology*, 2025, 30(2): 813-829.
- [17] ZHAI L, WANG L, REN Y. Multi-domain embedding strategies for video steganography by combining partition modes and motion vectors[C] // 2019 IEEE International Conference on Multimedia and Expo(ICME). IEEE, 2019: 1402-1407.
- [18] XING H, TIAN L, CAO M, et al. A multi-embedding domain video steganography algorithm based on TU partitioning and intra prediction mode[J]. *Neurocomputing*, 2024, 575: 127247.
- [19] FILLER T, JUDAS J, FRIDRICH J. Minimizing embedding impact in steganography using trellis-coded quantization [C] // *Media Forensics and Security II*. 2010: 38-51.
- [20] LI Z, MENG L, XU S, et al. A HEVC video steganalysis algorithm based on PU partition modes[J]. *Computers, Materials & Continua*, 2019, 59(2).
- [21] HUANG K, SUN T, JIANG X, et al. Combined features for steganalysis against PU partition mode-based steganography in HEVC[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2020, 79(41): 31147-31164.
- [22] DAI H, WANG R, XU D, et al. HEVC video steganalysis based on PU maps and multi-scale convolutional residual network[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2023, 34(4): 2663-2676.
- [23] ZHANG H, CAO Y, ZHAO X. A steganalytic approach to detect motion vector modification using near-perfect estimation for local optimality[J]. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2016, 12(2): 465-478.
- [24] LIU S, HU Y, LIU B, et al. An HEVC steganalytic approach against motion vector modification using local optimality in candidate list[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2021, 146: 23-30.
- [25] LI J, ZHANG M, NIU K, et al. A One-dimensional HEVC video steganalysis method using the Optimality of Predicted Motion Vectors[J]. *arxiv*: 2308.06464, 2023.
- [26] HE S, XU D, YANG L, et al. Adaptive HEVC video steganography with high performance based on attention-net and PU partition modes[J]. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2023, 26: 687-700.
- [27] ZHAI L, WANG L, REN Y. Universal detection of video steganography in multiple domains based on the consistency of motion vectors[J]. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2019, 15: 1762-1777.



YIN Hemin, born in 1998, postgraduate. His main research interests include video steganography technology, and so on.



ZHANG Yingnan, born in 1990, Ph.D., associate professor. His main research interests include digital watermarking, information hiding, steganalysis, and signal processing.