

基于帧内预测模式调制的 HEVC 信息隐藏方法

杨洁, 李松斌, 邓浩江

(中国科学院声学研究所国家网络新媒体工程技术研究中心, 北京 100190)

摘要: 为了进一步提高 HEVC 信息隐藏过程中的嵌入效率, 提出了一种 HEVC 帧内预测模式调制的信息隐藏方法。该方法根据密钥生成每个 CTU 的空间点阵维数 $N(N=2,3,4)$, 利用帧内预测模式选取规则选出 N 个顶角处的帧内预测模式, 通过空间点阵映射算法计算出映射值 F ; 然后从秘密信息比特文件中读取 N 个比特, 转换成十进制数 D 。实现了在 N 个帧内预测模式中最多改变一个模式即可嵌入 N 个比特秘密信息。实验验证该方法具有高嵌入效率、小码率增加以及视频质量几乎没有下降的特性, 通过抗隐写实验证实所提方法有高隐蔽性。

关键词: HEVC; 信息隐藏; 帧内预测模式; 空间点阵

中图分类号: TP309.2

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-109x.2016.00098

HEVC information hiding approach based on intra prediction modes modulation

YANG Jie, LI Song-bin, DENG Hao-jiang

(National Network New Media Engineering Research Center, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: For further improving the embedding efficiency in the processing of HEVC information hiding, a method for HEVC information hiding based on intra prediction models modulation was proposed. The space lattice dimension $N(N=2, 3, 4)$ of each CTU was generated according to the key. The selection rule of intra prediction mode was utilized to select N modes which were located at vertex angle. The N modes were mapped to the value F through the space lattice mapping algorithm. Then N bits secret information were read from the bit file and converted to a decimal number D . In this way, N secret information bits were embedded in N intra prediction modes by modifying at most one mode. The experimental results approve that the proposed method has high embedding efficiency, small rate increase and minimal influence on the video quality and the anti-steganalysis experiment confirms that the proposed method has high concealment.

Key words: HEVC, information hiding, intra prediction modes, space lattice

1 引言

随着网络技术和数字多媒体技术的日益成

熟, 特别是网络流媒体的迅速发展, 图像、音频、视频等多媒体的传输和交换变得非常快捷方便。视频信息因其直观性、确定性和高效性等特点,

收稿日期: 2016-07-02; 修回日期: 2016-08-26。通信作者: 李松斌, lisongbin_work@126.com

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61303249); 海南省应用技术开发基金资助项目 (No.ZDXM2015103); 中科院声学所南海站科研基金资助项目 (No.IOAHN201601)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61303249), The Application Technology and Development Project of Hainan Province (No.ZDXM2015103), The Scientific Research Foundation Project of Haikou Laboratory, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences (No.IOAHN201601)

逐渐取代音频和图像成为多媒体通信的主流。信息隐藏是把特定的信息隐藏在另一个称为载体(cover)的信息中,以得到隐蔽载体(stego cover)的过程,信息隐藏以其独特的安全特性、不可见性、顽健性等,已广泛应用于版权保护和隐蔽通信。信息隐藏在各种不同的载体中,视频是最为广泛使用的载体。

视频信息隐藏方法根据秘密信息嵌入位置的不同,可大致分为两类:一是在原始图像或视频中嵌入秘密信息;二是在图像或视频编码过程中嵌入秘密信息。第一类方法一般对视频帧像素进行操作,按照一定嵌入强度把秘密信息隐藏在像素中。视频为运动图像,该类方法的实质是图像信息隐藏。该方法直观、易于理解,但不能很好地抵抗压缩编码,即压缩编码后嵌入的信息可能丢失,而且,由于在像素上直接操作嵌入秘密信息,会造成视频较大失真。第二类方法将信息嵌入到图像视频编码处理过程中,即在编码的过程中结合编码标准某方面的特性进行信息的嵌入。

HEVC (high efficiency video coding) 是目前最新、最高效的视频压缩编码标准^[1],基于 HEVC 信息隐藏的相关研究还处在起步阶段。现有的 HEVC 信息隐藏方法都是在编码过程中进行的。Wang 等^[2~5]针对帧内预测模式进行了信息隐藏,文献[2]利用最优预测模式和次优预测模式的统计概率分布,构建预测模式与秘密信息映射关系实现信息隐藏;文献[3]利用分组码实现平均修改 1.25 个预测模式,在 4 个连续的 4×4 亮度块中嵌入 3 bit 秘密信息;文献[4]建立预测模式角度差和秘密信息之间的映射关系,实现在 4×4 亮度块中的信息隐藏;随后,在文献[3]的基础上,文献[5]利用 Hamming+1 减小码率增量和视频质量下降。Van 等^[6]通过调制 DCT 系数和运动矢量残差值实现信息隐藏,文献[7~9]在 HEVC 编码过程中通过 DCT 或 DST 系数调制隐藏秘密信息。针对 HEVC 熵编码过程, Jiang 等^[10]提出了 CBIB 概念,并结合运动矢量残差中的 CBIB,基于 CABAC 进行信息隐藏,同时不会引起码率增加。

针对 HEVC 帧内预测模式,本文提出一种嵌入效率更高的信息隐藏算法,实现在 N 个预测模式中最多修改一个预测模式即可嵌入 N bit 秘密

信息。本文以一个编码树单元作为信息隐藏算法的处理对象,在编码树单元中选取 N (N 是通过密钥生成的随机数)个预测模式作为待嵌入载体,然后根据本文提出的空间点阵方法将待嵌入载体 N 个一组映射成 2^N 进制数,通过比对映射值与待嵌入秘密信息的关系来确定是否调制预测模式,实现秘密信息的嵌入。嵌入和提取的过程简单、快速,并且具有很好的透明性、隐蔽性和安全性。在获得较高嵌入率的同时,码流的比特率仅有少量增加,对视频的主客观质量没有造成必然影响。

2 HEVC 帧内预测

2.1 HEVC 划分技术

空间域上的方向性帧内预测是 H.264 首次引入且独有的高效编码技术,可以较好地预测像素在空间域的相关性并捕获图像的空间纹理结构特性,使 H.264 的帧内编码比之前的编码标准更高效。HEVC 也采用了空间域上的基于方向预测的帧内编码方法。但是,为了更加灵活和高效地捕获图像的局部纹理特征,HEVC 采用了更加精细的方向划分和更加精确的预测值生成算法,在更大程度上降低了帧内预测残差的能量,从而获得更高的编码效率。

之前的 H.264 等标准采用 16×16 的像素点块作为编码的基本单元,即宏块。为了应对高清乃至超高清视频的编码,HEVC 引入了编码树单元(CTU, coding tree unit)、编码单元(CU, coding unit)、预测单元(PU, prediction unit)和变换单元(TU, transform unit)新的灵活数据划分方式替代传统的固定宏块大小图像数据划分方式^[11]。在 HEVC 中,图像被划分成一系列的编码树单元作为基本处理单位。一个 CTU 可由 $L \times L$ ($L \in \{64, 32, 16\}$) 大小的亮度和相应色度分量的像素块以及相应的语法元素组成。CTU 可以迭代地划分成一棵二叉树,二叉树的每一层都是相同大小的 4 个块,二叉树的每个叶节点为一个编码单元,其大小可以为 64×64 、 32×32 、 16×16 或 8×8 。根据划分方式(part mode)的不同,一个 CU 可以划分成一个或多个 PU。帧内编码时,对于一个 $2N \times 2N$ 的 CU, PU 大小也为 $2N \times 2N$,当 N 为 4 时,还可以进一步划分为 4 个大小为 $N \times N$ 的 PU,每个 PU 分别进行方向预测。CTU 的 PU 二叉树结构如图 1 所示。

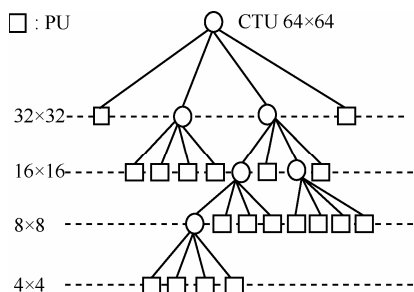


图1 CTU的PU树结构

2.2 亮度帧内预测模式取值

亮度帧内预测模式由2种提案中的帧内预测模式简化构成：任意方向帧内预测方法（ADI, arbitrary direction intra）和角度帧内预测方法（AIP, angular intra prediction），HEVC称其为简化的统一化帧内预测（simplified unified intra prediction），每种大小的PU都对应35种预测模式，所有预测模式的参考像素都是使用当前预测单元上面和左边相邻的像素经线性插值得到的 $\frac{1}{32}$ 亚像素。图2给出了PU块大小为 32×32 时的33种方向预测分布情况（不包含DC模式和Planar模式）。

3 预测模式空间的构造与候选预测模式集生成

设预测模式列表为 $PML = \{P_1, P_2, \dots, P_m\}$ ，从列表中取出 $N(N \leq m)$ 个预测模式构成一个 N 元组： $\tau = (x_1, x_2, \dots, x_N)$ ，其中， $x_i (i \leq N)$ 表示从 PML 取出的某个预测模式。

以 τ 为坐标集， x_i 为第 i 维坐标，可以构造出一个 N 维立体空间，称为预测模式空间，用 Γ 表示。显然，对于任意给定的 N 元组 τ ，它对应 Γ 中的一个点，该点的值用函数 $f(x_1, x_2, \dots, x_N)$ 表

示。所有 Γ 空间中的点构成一个 N 维空间点阵。

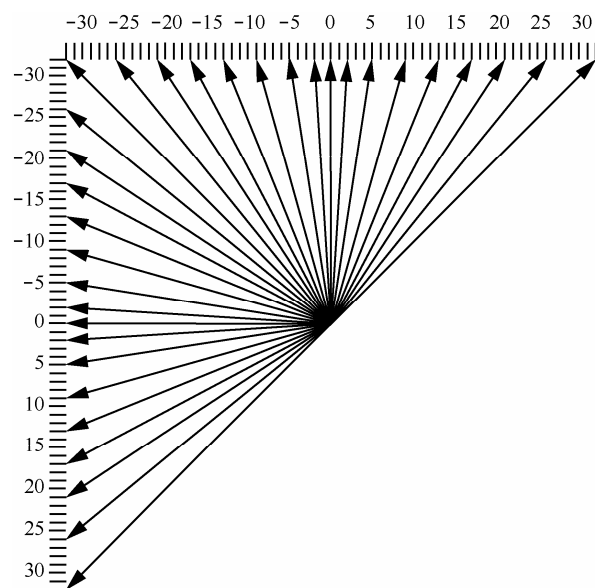


图2 帧内预测模式

下面给出对 Γ 中每个点进行赋值的方法。

Step 1 对 Γ 空间中第一维数轴上的点进行赋值： $f(x_1) = x_1 \bmod 2^N$ 。

Step 2 将第一维数轴上点的值扩散到二维平面 $f(x_1, x_2) = (f(x_1) + x_2) \bmod 2^N$ 。

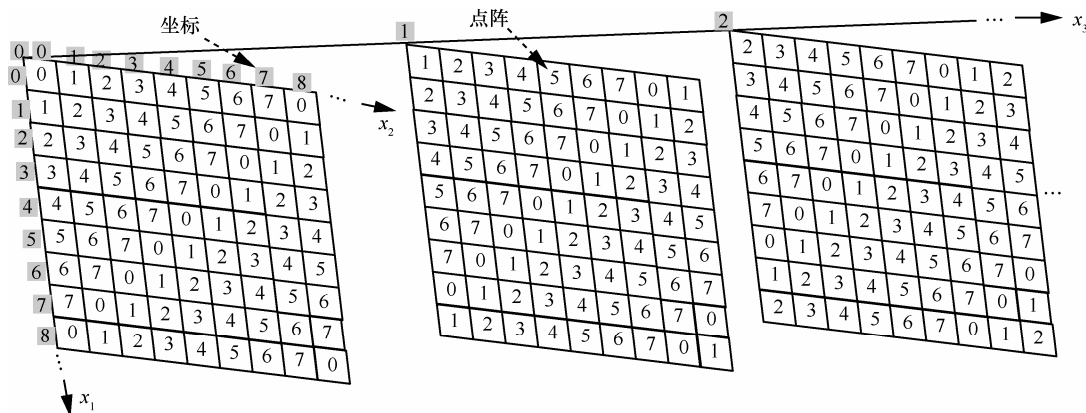
Step 3 将二维平面上点的值扩散到三维空间 $f(x_1, x_2, x_3) = (f(x_1, x_2) + x_3) \bmod 2^N$ 。

.....

Step N 将 $N-1$ 维空间上点的值扩散到 N 维空间 $f(x_1, x_2, \dots, x_N) = (f(x_1, x_2, \dots, x_{N-1}) + x_N) \bmod 2^N$ 。

图3给出了当 $N=3$ 时按上述方法所构造的预测模式空间部分示例。

根据上述方法得到的空间点阵如图3所示，

图3 预测模式空间构造结果部分示例 ($N=3$)

称该赋值方法为预测模式空间点阵循环编码。下面证明 Γ 具有如下重要性质。

定理 1 采用预测模式空间点阵循环编码得到的 N 维空间点阵中每个点的值可简化表示为 $f(x_1, x_2, \dots, x_N) = (x_1 + x_2 + \dots + x_N) \bmod 2^N$ 。

证明 根据上文空间点阵中点的循环赋值方法, 可得

$$\begin{aligned} & f(x_1, x_2, \dots, x_N) \\ &= (f(x_1, x_2, \dots, x_{N-1}) + x_N) \bmod 2^N \\ &= ((f(x_1, x_2, \dots, x_{N-2}) + x_{N-1}) \bmod 2^N + x_N) \bmod 2^N \\ &\dots \\ &= ((x_1 \bmod 2^N + x_2) \bmod 2^N + \dots + x_N) \bmod 2^N \quad (1) \end{aligned}$$

下面证明 $(x_1 \bmod 2^N + x_2) \bmod 2^N = (x_1 + x_2) \bmod 2^N$ 。

令 $(x_1 \bmod 2^N + x_2) \bmod 2^N = J$ 可得 $x_1 \bmod 2^N + x_2 = J + M2^N$, M 为非负整数, 即 $x_1 \bmod 2^N = J + M2^N - x_2$, 得 $x_1 = J + M2^N - x_2 + K2^N$, K 为非负整数, 将 x_1 代入到 $(x_1 + x_2) \bmod 2^N$ 得

$$\begin{aligned} & (x_1 + x_2) \bmod 2^N \\ &= (J + M2^N - x_2 + K2^N + x_2) \bmod 2^N \\ &= (J + M2^N + K2^N) \bmod 2^N \\ &= J \quad (2) \end{aligned}$$

即得

$$(x_1 \bmod 2^N + x_2) \bmod 2^N = (x_1 + x_2) \bmod 2^N = J$$

以此类推式, 式(1)可进行如下变换

$$\begin{aligned} & f(x_1, x_2, \dots, x_N) \\ &= ((x_1 + x_2) \bmod 2^N + \dots + x_N) \bmod 2^N \\ &= ((x_1 + x_2 + x_3) \bmod 2^N + \dots + x_N) \bmod 2^N \\ &\dots \\ &= (x_1 + x_2 + \dots + x_N) \bmod 2^N \quad (3) \end{aligned}$$

即得 $f(x_1, x_2, \dots, x_N) = (x_1 + x_2 + \dots + x_N) \bmod 2^N$ 。

定理 2 任意给定一个正整数 $D \in \{0, 1, 2, \dots, 2^N - 1\}$ 以及 $\tau = (x_1, x_2, \dots, x_N)$, 对任意选定的空间点阵的第 i 个维度, 当该维度的坐标 x_i 可调时, 可至少找到一个点, 使 $f(x_1, x_2, \dots, x_N) = D$ 。

证明 由定理 1 可得

$$f(x_1, x_2, \dots, x_N) = (x_1 + x_2 + \dots + x_N) \bmod 2^N$$

下面首先证明对于第一个维度上述定理成立。

设将 x_1 改为 x'_1 , 可得 $f(x'_1, x_2, \dots, x_N) = (x'_1 +$

$$x_2 + \dots + x_N) \bmod 2^N = D$$

因此有 $x'_1 = D + 2^N K - (x_2 + x_3 + \dots + x_N)$, K 为非负整数, 下面证明这样的 x'_1 存在。

由于 x_i 是非负整数, 设其取值范围为 $[0, \theta]$, 且 K 可取任意非负整数, 假设 $K = \alpha$ 时, $D + 2^N K - (x_2 + x_3 + \dots + x_N) = a < 0$; $K = \alpha + 1$ 时, $D + 2^N K - (x_2 + x_3 + \dots + x_N) = a + 2^N \geq 0$, 显然这样的 α 是存在的。由于 $x'_1 = a + 2^N \in [0, \theta]$, 为了使此条件成立, 则 $2^N \leq \theta$, 可得 $N \leq \lg \theta$, 即在此种条件下至少可找到一个 x'_1 , 使 $f(x'_1, x_2, \dots, x_N) = D$ 。在 HEVC 标准中, θ 取值为 34, 因此 N 最大可取 5。由于 K 具有多种取值, 因此 x'_1 也可能有多种取值, 取值个数与 N 和 θ 的大小有关。设 x'_1 这些可能的值构成的集合为 S_1 , 本文称 S_1 为维度 1 的对于正整数 D 的候选模式集。

用同样的方法可证明, 其他维度上述定理仍然成立, 对第 i 个维度可计算得到候选模式集 S_i 。所有维度的候选模式集构成嵌入正整数 D 时的可选预测模式集, 用 Ω 表示。

4 信息的嵌入与提取过程

本文所提信息隐藏算法利用预测模式 N 元组 τ 在点阵空间中的映射值与二值化后待嵌入秘密信息比特块之间的预测关系, 将信息嵌入到 I 帧 (关键帧) 中亮度分量的某些预测单元中。本文所提信息隐藏算法如图 4 所示。本文以 CTU 为基本单位进行信息嵌入, 嵌入前首先对视频序列进行预编码, 确定最优的编码树结构及每个 PU 的最优预测模式; 然后根据密钥选取符合给定规则的 PU 形成 PML , 作为信息隐藏载体; 将要嵌入的秘密信息进行加密并二值化; 根据上文定义的方法, 每次从 PML 中取 N 个预测模式形成 N 元组 τ , 从二值化秘密信息中取出 N 个比特并将其转化为正整数 D , 使用上文介绍的候选模式集生成规则确定嵌入 D 时的可选预测模式集 Ω ; 根据已经确定的编码树结构和 Ω , 基于率失真优化技术, 在 Ω 中选择一个与最低率失真值夹角最小的预测模式作为最终预测模式并输出到码流中, 这样就得到了隐藏信息后的 HEVC 视频流。下面对算法进行详细介绍。

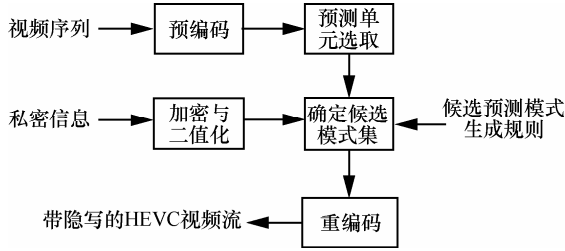


图4 本文信息隐藏算法流程

4.1 嵌入条件与预测单元选取

本文的预测单元选取与预测单元所在图像区域的纹理有关。在视频帧的平坦区域进行信息嵌入对视频的影响较大，这是因为平坦区域最优预测方向对应的率失真往往远低于其他预测方向，修改该预测模式引入附加失真也将较大；相反，在纹理复杂区域，各个预测模式的率失真值相差较小，进行修改影响不大。本文引入一个简单的规则来判定某个 PU 是否属于纹理复杂区域，图像平坦区域一般 CTU 包含的 PU 较少，因此，本文将 CTU 包含的 PU 数量作为判断该 CTU 是否进行信息隐藏的一个条件，只有 PU 数量超过预先设定的阈值时，该 CTU 才可进行信息隐藏。

根据信息安全的一般法则，假设本文的信息隐藏算法是公开的，算法的安全性主要依靠用户的密钥来保障。因此，本文假设进行信息隐藏的用户拥有一个密钥 E ，它由多位数字组成。为了使用户可以灵活地控制信息嵌入的规模，本文还引入了嵌入强度，用 e 表示，它是一个小数，值域为 $[0,1]$ ，表示当前 CTU 进行信息隐藏的概率。在每个 CTU 进行信息隐藏之前，由随机小数生成器 G 生成一个小数 r ，其中 $0 \leq r \leq 1$ ；若 $r \leq e$ ，则当前 CTU 将进行信息隐藏；反之，当前 CTU 不进行信息隐藏。因此，本文对预测单元的选取包含 2 个层次：确定 CTU 层和 PU 层。具体过程可参看下文嵌入过程。

基于上述方法得到的视频测试序列可嵌入 PU，示例如图 5 所示（黑色加粗矩形框表示一个 CTU，白色块表示载体 PU），其中每个 CTU 最多嵌入 4 bit 信息，且在 CTU 的 4 个 $\frac{1}{4}$ 子块的左上顶角 PU 上。由于修改预测模式后，CTU 结构会发生变化，如果结构变化很大，会导致秘密信息提取很复杂或不能正确提取，因此本文选择在 $\frac{1}{4}$

子块的左上顶角 PU 作为载体，如果 4 个子块的 PU 经过调制后的预测模式相同，认为此次嵌入失败，该 CTU 不进行信息嵌入。

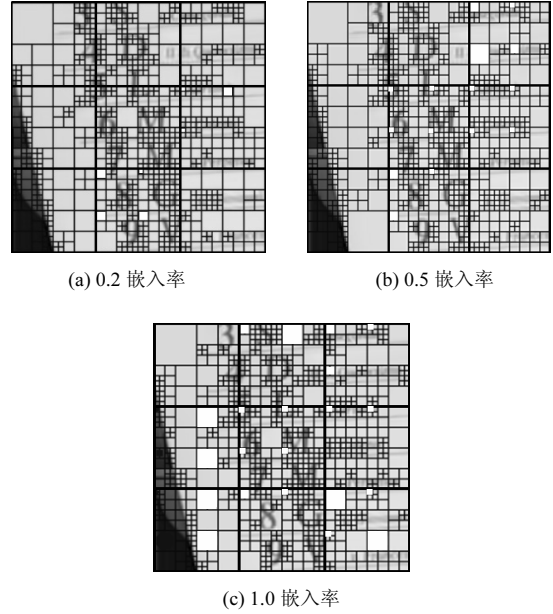


图5 选中的PU示例

4.2 信息的嵌入

信息嵌入算法如下。

Step 1 以密钥 E 作为种子，初始化随机数小数生成器 G ，设定初始化嵌入失败标志 W 为 0。

Step 2 编码端取一个 CTU，由 G 生成一个随机小数 r ，如果 $r \leq e$ ，则转入下一步，否则，跳到 Step9。

Step 3 若 W 为 0，计算当前 CTU 的空间维度数 $N = [\text{int}100r] \bmod 3 + 2$ ，否则， N 值继续使用上一个 CTU 的值。

Step 4 若 W 为 0，从私密信息比特流中取 N 个比特，计算出它们对应的十进制数 D ，否则， D 继续使用上一个 CTU 的值。

Step 5 原始 CTU 编码后，取 4 个子块顶角的预测模式 p_i ，从中选出前 N 个，取其预测模式记为 $p_1, p_2, \dots, p_N$ ，计算其空间点阵映射值

$$F = f(p_1, p_2, \dots, p_i, \dots, p_N) = \left(\sum_{i=1}^N p_i \right) \bmod 2^N。$$

Step 6 若 $F \neq D$ ，则固定 $p_1, p_2, \dots, p_N$ 中的 $N-1$ 个，对剩下的一个在其候选预测模式中选择进行修改，使新的 $F' = D$ ，从所有修改中找出修改角度最小的一个作为最终修改方案。若 $F = D$ ，则执

行 Step 8。

Step 7 进行二次编码, 二次编码中根据新的顶角预测模式修正帧内预测结果。

Step 8 判断整个 CTU 的预测模式是否都等于第一个帧内预测模式的值, 若等于, 则设置失败标志 W 为 1, 否则, 设置为 0。

Step 9 判断是否所有 CTU 都已执行完毕, 若没有则返回 Step 2, 否则, 结束。

4.3 信息的提取

在本文算法中, 对隐藏信息的提取操作简单、快速, 仅解码码流中的帧内预测模式信息即可实现信息提取, 而不必完整的视频解码, 也不必提供原始媒体信息。具体过程如下。

Step 1 以密钥 E 作为种子, 初始化随机数小数生成器 G , 设定初始化嵌入失败标志 W 为 0。

Step 2 解码端取一个 CTU, 由 G 生成一个随机小数 r , 如果 $r \leq e$, 则转入下一步, 否则, 跳到 Step 6。

Step 3 若 W 为 0, 计算当前 CTU 的空间维度数 $N = [\text{int}100r] \bmod 3 + 2$, 否则, N 值继续使用上一个 CTU 的值。

Step 4 取 4 个子块顶角的预测模式 p_i , 则从中选出前 N 个, 取其预测模式记为 $p_1, p_2, \dots, p_N$ 。计算其空间点阵映射值 $F = f(p_1, p_2, \dots, p_i, \dots, p_N) = \left(\sum_{i=1}^N p_i \right) \bmod 2^N$ 。

Step 5 将 F 转换为二进制比特, 写进私密信息文件。

Step 6 判断是否所有 CTU 都已执行完毕, 若没有则返回 Step 2, 否则结束。

5 实验

为了充分评论本文方法的性能, 本文从隐写

算法对视频质量的影响、码率增量、嵌入效率以及抗隐写分析 4 个方面进行实验。在评估的过程中, 引入方法 Hamming+1 中的嵌入规则作为在本文选取的预测模式上进行秘密信息的嵌入对比。

5.1 实验说明

本文方法在 HEVC 的参考软件 HM14.0 上进行了实现, 选取了 6 个常用的测试序列: BasketballDrive、BQTerrace、Cactus、Kimono1、ParkScene、Tennis, 采用全 I 帧编码方式。为了更全面地评价本文算法, 本文测试了本文算法嵌入强度为 0.2、0.5 和 1.0 时对各指标的影响。为了便于叙述, 本文以 CLEAN、ME0.2、ME0.5、ME1.0 分别表示未嵌入和 3 种不同嵌入强度的本文算法。

5.2 视频质量分析

图 6 是 Cactus_1920x1080_5 序列在不同嵌入率下依据本文算法嵌入前后部分图像截取, 其中, 纯黑色块是选取的 PU 块, 白色块是修改了帧内预测模式的 PU 块。由图 6 可知, 随着嵌入率的提升, 图像块中被选取作为载体的 PU 预测模式增多, 而载体实际修改量很小, 因此本文算法对视频质量影响极小, 下面从视频质量主观评价和客观评价 2 个方面进行说明。

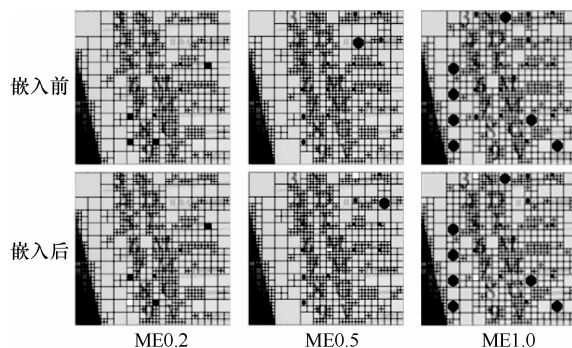


图 6 不同嵌入率隐写前后, 部分图像预测模式的变化情况

首先从视频质量主观评价进行分析, 图 7 为

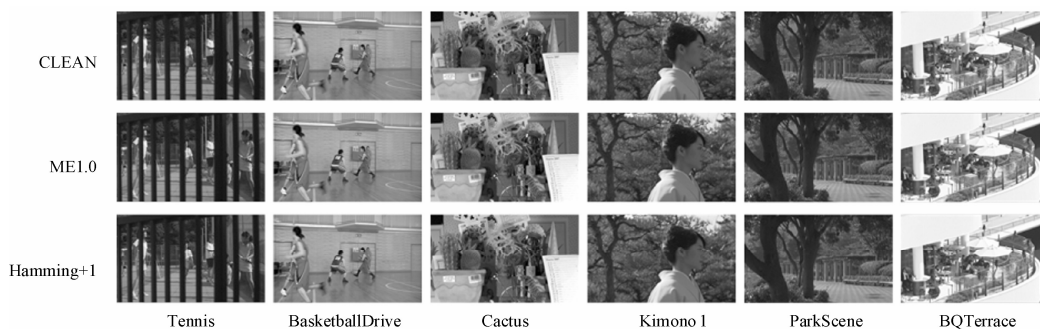


图 7 视频图像隐写前后对照

各个序列嵌入秘密信息前后的对比图像。从图 7 可以发现本文算法在嵌入强度为 1.0 时对视频的主观视觉感官并没有产生明显影响,与隐写算法 Hamming+1 相比,主观感受没有明显差别。下面从嵌入前后 PSNR 变化来分析本文算法对视频的客观影响,其结果如图 8 所示。

从图 8(a)和图 8(b)可以看出,随着嵌入强度的增加,PSNR 略有下降。在实验的过程中,本文在嵌入相同数量的秘密信息时,对比 ME1.0 和 Hamming+1 这 2 种方法,其 PSNR 变化如图 8(c)和图 8(d)所示,PSNR 下降都很小,并且 ME1.0 和 Hamming+1 对 PSNR 的影响很接近。此外,由图 8 可知,PU 数量阈值对 PSNR 的影响也很小,因此可以通过减小 PU 数量阈值来增大嵌入载体数量。总的来说,采用本文方法嵌入秘密信息后,视频的客观质量并没有明显下降。

5.3 码率分析

信息隐藏的过程中调制了 PU 的帧内预测模式,这种情况通常会引起压缩码率的增加。图 9 列出了 6 个 HEVC 序列在采用 3 种不同嵌入强度进行秘密信息嵌入和采用 Hamming+1 规则嵌入秘密信息后的视频压缩码率情况,其中,在嵌入

相同数量的秘密信息时对比了 ME1.0 和 Hamming+1 这 2 种方法的码率变化情况。

由图 9 可以得到与 PSNR 变化情况相似的结论,即随着嵌入强度的增加,码率增量逐渐变大,ME1.0 和 Hamming+1 这 2 种方法的码率增量相当且均较小。

5.4 嵌入效率分析

本节从隐写嵌入率(HR)、修改率(CR)和嵌入效率(EE)对本文方法进行分析。设载体数量为 N ,嵌入秘密信息长度为 M ,对载体修改的个数为 K ,则 HR、CR、EE 为

$$\begin{aligned} HR &= \frac{M}{N} \\ CR &= \frac{K}{N} \\ EE &= \frac{M}{K} \end{aligned} \quad (4)$$

表 1 列出了 PU 数量阈值为 24 的情况下,使用 3 种嵌入强度对 6 个 HEVC 视频序列进行信息隐藏的分析。从表 1 可以看出,随着嵌入强度的增加,嵌入比特数随之增加,对 HR、CR、EE 影响很小。本文实验了在 PU 数量阈值为 16 的情况,

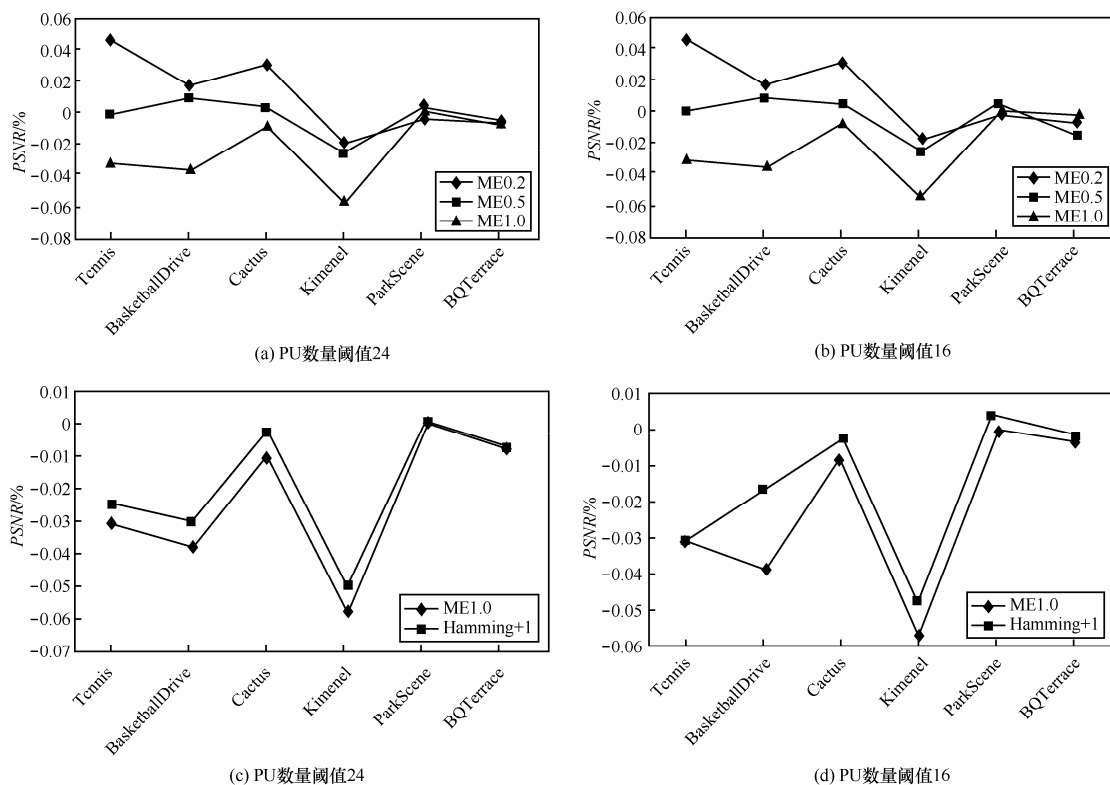


图 8 不同隐写方法及不同 PU 数量阈值下的 PSNR 变化

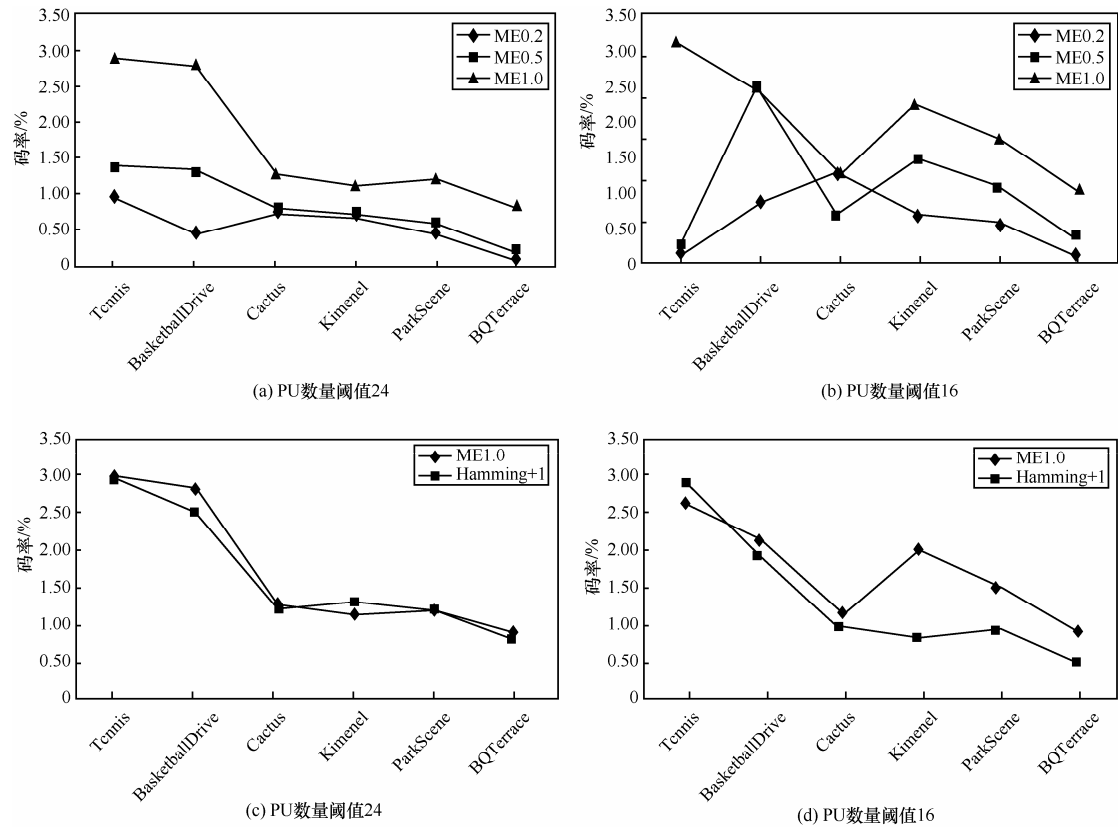


图9 不同隐写方法及不同 PU 数量阈值下的码率变化

表 1

本文算法在不同嵌入强度下的嵌入效率

序列	嵌入强度	PU 数量阈值 (24)					
		载体数量/个	嵌入位数/个	修改位数/个	隐写嵌入率	修改率	嵌入效率
Tennis	ME0.2	49	49	14	1.000 0	0.285 7	3.500 0
	ME0.5	130	130	39	1.000 0	0.300 0	3.333 3
	ME1.0	268	268	81	1.000 0	0.302 2	3.308 6
BasketballDrive	ME0.2	51	51	15	1.000 0	0.294 1	3.400 0
	ME0.5	117	117	34	1.000 0	0.290 6	3.441 2
	ME1.0	252	252	79	1.000 0	0.313 5	3.189 9
Cactus	ME0.2	106	106	35	1.000 0	0.330 2	3.028 6
	ME0.5	303	303	97	1.000 0	0.320 1	3.123 7
	ME1.0	656	656	182	1.000 0	0.277 4	3.604 4
Kimono1	ME0.2	11	11	3	1.000 0	0.272 7	3.666 7
	ME0.5	19	19	5	1.000 0	0.263 2	3.800 0
	ME1.0	31	31	8	1.000 0	0.258 1	3.875 0
ParkScene	ME0.2	108	108	34	1.000 0	0.314 8	3.176 5
	ME0.5	270	270	71	1.000 0	0.263 0	3.802 8
	ME1.0	525	525	145	1.000 0	0.276 2	3.620 7
BQTerrace	ME0.2	150	150	46	1.000 0	0.306 7	3.260 9
	ME0.5	358	358	102	1.000 0	0.284 9	3.509 8
	ME1.0	690	690	209	1.000 0	0.302 9	3.301 4

其结果相比 PU 数量阈值为 24 时, 嵌入比特数有所增加, 这是因为随着 PU 数量阈值的下降, 秘密信息载体数量会增加, 嵌入比特数随之增加。另外, 本文实验了 Hamming+1 方法, 由于该方法是在 4 个载体中嵌入 3 bit 秘密信息, 因此, 对比实验在 CTU 的 4 个子块顶角 PU 均作为载体的情况下进行, 6 个视频的平均结果如表 2 所示。

表 2 不同方法的嵌入效率对比结果			
方法	平均隐写嵌入率	平均修改率	平均嵌入效率
本文方法	1.000 0	0.293 1	3.425 1
Hamming+1 方法	0.750 0	0.330 0	3.000 0

由表 2 可知, 本文方法具有更高的隐写嵌入率和嵌入效率以及更低的修改率, 从理论的角度也可以得到相应的结论。Hamming+1 隐写嵌入率为 $\frac{3}{4}$, 即在 4 个载体中嵌入 3 个比特秘密信息, 同时调制一个载体; 本文方法隐写嵌入率为 $\frac{4}{4}$, 即在 4 个载体中可以嵌入 4 个比特秘密信息, 同

时最多调制一个载体。

5.5 抗隐写分析

本节对本文嵌入方法的抗隐写性能进行评估。一个优秀的信息隐藏算法被隐写分析算法成功检测的概率比较低。因此, 抵抗隐写检测性能是信息隐藏算法评估的重要指标, 本文采用文献[12]的隐写检测算法对本文方法进行抗攻击性能评估。

对每一个序列, 首先编码后再解码得到原始载体的样本数据; 然后在编码过程中运用本文嵌入算法, 修改嵌入率、PU 数阈值, 接着解码得到不同对照组隐写后的样本数据。完成以上步骤之后, 使用文献[12]的方法对样本数据进行隐写检测, 判断样本数据是否被嵌入秘密信息。实验结果如表 3 所示。

从表 3 可以发现本文算法隐写检测成功概率均小于 60%, 说明本文信息隐藏算法具有很高的隐蔽性。这是因为本文放大对帧内预测模式的修改非常少, 即便修改也是在保证预测方向最小的角度修改, 因此运用本文信息隐藏方法进行秘密信息嵌入解码后得到的图像序列,

表 3 不同嵌入强度下信息隐藏检测结果			
序列	嵌入强度	PU 数量阈值	
		24	16
Tennis	ME0.2	49.25%	52.38%
	ME0.5	51.13%	53.50%
	ME1.0	55.00%	57.25%
BasketballDrive	ME0.2	49.92%	52.67%
	ME0.5	51.93%	53.79%
	ME1.0	55.60%	57.84%
Cactus	ME0.2	49.69%	52.94%
	ME0.5	51.61%	53.55%
	ME1.0	55.39%	57.28%
Kimono1	ME0.2	50.06%	53.12%
	ME0.5	51.65%	54.06%
	ME1.0	55.56%	57.69%
ParkScene	ME0.2	49.31%	53.20%
	ME0.5	51.80%	53.95%
	ME1.0	55.20%	57.67%
BQTerrace	ME0.2	49.97%	53.08%
	ME0.5	51.85%	54.19%
	ME1.0	55.46%	57.35%

与未隐写直接解码的图像序列差别不是很大, 所以本文信息隐藏算法是一个高隐蔽性的安全信息隐藏算法。

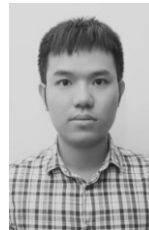
6 结束语

本文提出了一种 HEVC 帧内预测模式调制的信息隐藏方法, 实现了在 N 个帧内预测模式中最多改变一个模式即可嵌入 N bit 秘密信息。本文具有灵活的嵌入方式, 根据情况设置 N 的大小和 PU 数量阈值大小来控制嵌入容量和嵌入效率。实验验证该方法具有高嵌入效率、小码率增加以及视频质量几乎没有下降的特性, 同时本文方法具有高隐蔽性。由于本文方法需要重编码且只选择了部分预测模式作为信息隐藏载体, 时间开销高且嵌入容易有限, 在接下来的研究中, 将重点从这 2 个方面进行更深入的研究。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] WANG J J, WANG R D, LI W, et al. A large-capacity information hiding method for HEVC video[C]//The 3rd International Conference on Computer Science and Service System. 2014: 934-937.
- [3] WANG J J, WANG R D, LI W, et al. An information hiding algorithm for HEVC based on intra-prediction mode and block code[J]. Sensors & Transducers, 2014, 117(8): 230-237.
- [4] WANG J J, WANG R D, XU D W, et al. An information hiding algorithm for HEVC based on angle differences of intra prediction mode[J]. Journal of Software, 2015, 10(2): 213-221.
- [5] XU J, WANG R D, HUANG M L. An information hiding algorithm for HEVC based on intra-prediction modes and Hamming+1[J]. Journal of Computational Information Systems, 2015, 11(15): 5587-5598.
- [6] VAN L P, PRAETER J D, WALLENDIAEL G V, et al. Out-of-the-loop information hiding for HEVC video[C]//2015 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). 2015: 3610-3614.
- [7] TEW Y Q, WONG K. Information hiding in HEVC standard using adaptive coding block size decision[C]//2014 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). 2014: 5502-5506.
- [8] CHANG P C, CHUNG K L, CHEN J J, et al. A DCT/DST-based error propagation-free data hiding algorithm for HEVC intra-coded frames[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2014, 25(2): 239-253.
- [9] ZHANG X Y, AU O C, PANG C, et al. Additional sign bit hiding of transform coefficients in HEVC[C]//2013 IEEE International Conference on Multimedia and Expo Workshops (ICMEW). 2013: 1-4.
- [10] JIANG B, YANG G B, CHEN W B. A CABAC based HEVC video steganography algorithm without bitrate increase[J]. Journal of Computational Information Systems, 2015, 11(6): 2121-2130.
- [11] KIM I K, MIN J, LEE T, et al. Block partitioning structure in the HEVC standard[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2012, 22(12): 1697-1706.
- [12] PEVNÝ T, BAS P, FRIDRICH J. Steganalysis by subtractive pixel adjacency matrix[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2010, 5(2): 215-224.

作者简介:



杨洁 (1989-), 男, 重庆开县人, 中国科学院声学研究所博士生, 主要研究方向为多媒体信号处理和信息隐藏。



李松斌 (1989-), 男, 福建漳州人, 中国科学院声学研究所副研究员、硕士生导师, 主要研究方向为多媒体信号处理与取证。



邓浩江 (1971-), 男, 北京人, 中国科学院声学研究所研究员、博士生导师, 主要研究方向为数字音视频处理、宽带多媒体通信、模式识别。