

DOI:10.16136/j.joel.2017.07.0362

基于预测模式相关性的 HEVC 隐写检测算法

盛 琪, 王让定*, 王 斌, 李 倩, 徐达文

(宁波大学 信息科学与工程学院, 浙江 宁波 315211)

摘要:提出了一种基于预测模式相关性的高效视频编码(HEVC)隐写检测方法。首先定义帧内预测模式相关性的概念;然后通过实验,分析隐写前后帧内 4×4 亮度块中35种帧内预测模式的相关性统计数据的变化情况;最后选择35个隐写前后变化较大的相关性数据构成视频特征,并利用支持向量机(SVM)分类器进行隐写检测。实验表明,本文检测方法的特征维数低,计算复杂度小,对修改帧内预测模式的隐写算法具有良好的检测效果。

关键词:高效视频编码(HEVC);预测模式;相关性;隐写分析

中图分类号:TN919.81 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-0086(2017)07-0766-07

Steganography detection algorithm based on the prediction mode correlation for HEVC

SHENG Qi, WANG Rang-ding*, WANG Bin, LI Qian, XU Da-wen

(Ningbo University, College of Information Science and Engineering, Ningbo 315211, China)

Abstract: At present, information hiding algorithm based on modified intra-prediction mode has been proposed in the H.265/HEVC. The steganographic algorithm embeds secret information by modifying the intra-prediction mode. But there is no steganalysis method for H.265/HEVC from the available literature. This paper proposes a steganalysis method based on the correlation of intra-prediction mode. The concept of the correlation of intra-prediction mode is defined firstly, then we analyze the correlation of 35 kinds of intra-prediction modes in the 4×4 luma block before and after information hiding through abundant experimental data. 35 correlation data which change a lot after information hiding are chosen to constitute the video features. Lastly, the video features will be sent to support vector machine (SVM) classifier to finish the detection of information hiding. Experimental results demonstrate that the algorithm has good detection effect while the feature dimension is low, and the computational complexity is small.

Key words: high efficiency video coding (HEVC); prediction mode; correlation; steganalysis

1 引 言

高效视频编码(H.265/HEVC)是国际电信组织和移动视频专家组制定的新一代视频编码标准^[1]。与上一代编码标准 H.264/AVC 相比,它具有更好的压缩性能,在计算复杂度有一定增加的前提下降低 50% 比特率,使得 HEVC 适用范围更广,尤其在高清、超高清等视频应用领域发挥重要作用^[2]。

基于 HEVC 的信息隐藏技术,目前已有的隐藏算法包括基于运动矢量调制的方法^[3,4]、基于 DCT/DST 调制的方法^[5,6]以及基于帧内预测模式调制的方法^[7~11]。但是,目前还未有针对 HEVC 预测模式隐写的检测方法提出。在 H.264/AVC 中,已有部分检测算法提出。文献[12]认为修改预测模式的隐写算法会改变原始视频帧内预测模式之间的统计特性,该算法统计 I 帧宏块内不同方向的 4×4 块预测模式,通过构建一阶和二阶马

* E-mail: wangrangding@nbu.edu.cn

收稿日期:2016-07-17 修订日期:2016-09-05

基金项目:国家自然科学基金(61301247, 61300055)、浙江省自然科学基金(Z15F020010)、浙江省重中之重学科开放基金(xkx11405)和宁波大学优秀学位论文培育基金(py2013005)资助项目

尔科夫矩阵作为检测特征,其特征维数较高,检测算法较复杂。文献[13]假设并论证了载密信息的视频经过重压缩,其帧内预测模式有向原始视频帧内预测模式复原的倾向,构建原始视频与重压缩视频帧内预测模式的转移概率矩阵,以此作为特征进行检测,因其需要对视频进行二次压缩并提取重压缩后的帧内预测模式,所以特征构造过程所需时间较长。

H. 265/HEVC 的编码过程较 H. 264/AVC 更加复杂,帧内编码中,HEVC 采用大小可变的编码单元代替了 H. 264/AVC 中的宏块结构,预测模式也增加到了 35 种^[14]。因此,H. 264/AVC 中的检测算法不能直接用于 H. 265/HEVC 中。本文在分析 H. 265/HEVC 编码特性的基础上,提出了一种针对 HEVC 预测模式隐写的检测算法。

2 HEVC 帧内预测编码

2.1 HEVC 帧内预测

相对于 H. 264/AVC 中宏块的概念,H. 265/HEVC 采用了编码单元(CU)作为基本的编码结构。一个 CU 可以包含一个或多个不同尺寸的预测单元(PU),一个 PU 包含若干变换单元(TU)。采用这种结构设计的目的是在增加灵活性的同时,使压缩预测更符合图像特性^[15]。帧内预测技术可以除去相邻块之间的空间冗余度,取得更为有效的压缩。在 H. 264 中,4×4 亮度块的帧内预测有 9 种预测模式,16×16 亮度块的帧内预测有 4 种预测模式。HEVC 的帧内预测过程是 H. 264 的扩展和深入,扩展的是预测方向的个数,深入的是预测方向的判断过程。如图 1 所示,HEVC 细化了帧内预测的方向,共 35 种模式,分别是 Planar 模式、DC 模式和 33 种角度模式。其中,Planar 模式适用于像素缓慢变化的区域,DC 模式适用于大面积平坦区域。

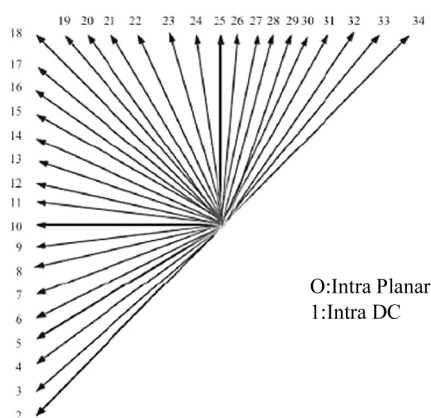


图 1 HEVC 帧内预测模式

Fig. 1 Intra-prediction mode for HEVC

2.2 帧内预测模式选择

帧内预测模式的选择可以分为 3 个流程:

首先,对所有 35 种模式进行粗选(RMD),计算所有可能的预测模式的率失真(RD)代价,其中最小的一组预测模式即为 RMD 子集。子集中预测模式的数量 N 与 PU 尺寸有关,例如在 4×4 中 $N=8$, 8×8 中 $N=8$, 16×16 中 $N=4$ 等^[16]。RD 代价计算公式为

$$J(s, c, IMODE/QP, \lambda_{MODE}) = D(s, c, IMODE/QP) + \lambda_{MODE} \cdot R(s, c, IMODE/QP) \quad (1)$$

其中:QP 为量化参数; λ_{MODE} 为拉格朗日参数; s, c 分别代表原始块与重建块; R 为视频流码率; D 为输出比特流的失真度。

其次验证最有可能的预测模式,即当前单元左侧与上侧的 3 个已编码单元的预测模式,有没有在 RMD 子集内,若没有则加入子集。

最后对 RMD 子集中的预测模式进行 RD 代价值精密计算,代价最小的模式即为最优预测模式^[17]。

3 隐写前后视频特征变化

3.1 帧内预测模式相关性

由于视频内容在空间上的相关性,结合 HEVC 帧内预测编码的原理及过程,猜想相邻编码块的帧内预测模式会有较强的相关性,即相邻块的帧内预测模式在数值上会有很大几率相同或者相近。对于一个编码单元,采用 Zig-Zag 扫描,如图 2 所示,得到一个预测模式序列 $S = (P_1, P_2, \dots, P_N)$, $P_k (k \in [1, N])$ 为预测模式值, $P_k \in [0, 34]$, N 为编码单元划分的块的数量。逐一扫描每个编码单元,直到整帧视频扫描完成,并对所有 I 帧进行类似操作。将扫描得到的序列组合,构成一个视频片段的预测模式序列。定义预测模式相关性 $C_{(i-j)}$ 为在连续的 2 个 4×4 块中,当前块 M_1 预测模式为 i 的条件下,下一个相邻块 M_2 预测模式为 j 的统计概率, $C_{(i-j)} \in [0, 1]$ 。如 $C_{(2-2)}$ 、 $C_{(7-9)}$ 分别表示预测模式 2 和 2 的相关性以及预测模式 7 和 9 的相关性。相关性的计算如公式为

$$C_{(i-j)} = \frac{S_{(i-j)}}{\sum_{x=0}^{34} S_{(i-x)}} \quad (2)$$

其中: $C_{(i-j)}$ 表示预测模式 i 和 j 的相关性; $S_{(i-j)}$ 表示在提取的预测模式序列中,对于连续的两个 4×4 亮度块,当前亮度块预测模式为 i ,下一亮度块预测模式为 j 出现的次数; $i, j, x \in [0, 34]$ 。

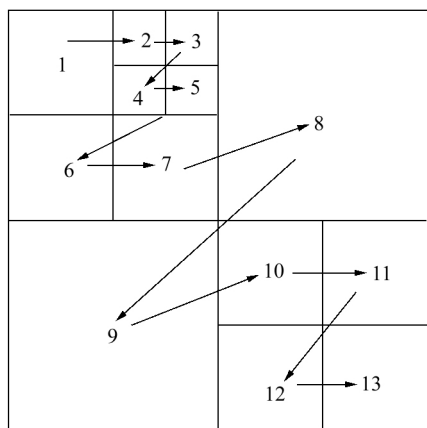


图 2 Zig-Zag 扫描

Fig. 2 Zig-Zag scan

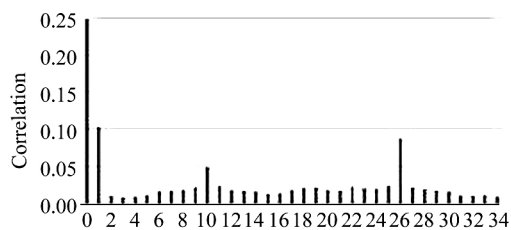
3.2 隐写引起的相关性变化

为直观的反应帧内预测模式相关性的变化,实验选取不同分辨率、不同内容的若干视频序列,提取所有帧内预测模式数据,并计算相邻 4×4 块帧内预测模式相关性统计数据。实验共得到 35 种预测模式的相关性数据。图3为随机选取的4种帧内预测

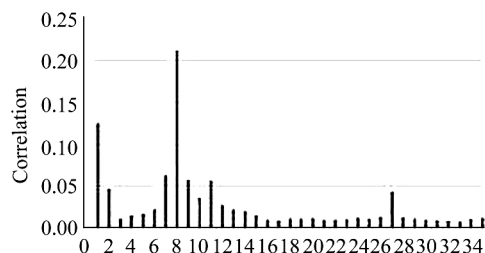
模式相关性统计实验结果。

从实验结果可以看出,原始视频的帧内预测模式与其自身相关性 ($C_{(0-0)}$ 、 $C_{(7-7)}$ 、 $C_{(17-17)}$ 、 $C_{(25-25)}$) 最高,即下一相邻编码块的预测模式最可能是当前编码块的预测模式,这与我们的猜想一致。其他预测模式相关性数据分布较为均匀,由于预测模式 0、1 应用于像素变化缓慢以及平坦区域,因此出现的概率高于其他预测模式。为了研究修改帧内预测模式的信息隐藏对原始视频预测模式相关性统计特性的影响,对选取的视频序列用文献[8]的方法进行信息隐藏,提取载密视频中帧内预测模式数据,并计算相邻 4×4 块预测模式相关性,将实验结果与原始视频比较,如图 4 所示。

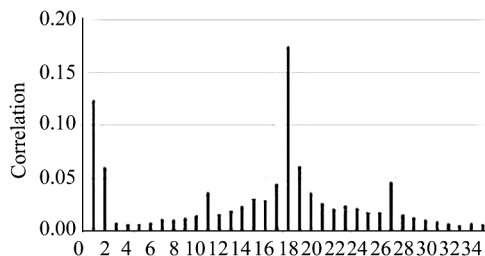
由图 4 可以看出,隐密信息的嵌入破坏了原始视频帧内预测模式相关性的统计特性,其中预测模式与其自身的相关性 ($C_{(0-0)}$ 、 $C_{(7-7)}$ 、 $C_{(17-17)}$ 、 $C_{(25-25)}$) 大大降低,与其他 34 种预测模式的相关性略微升高,但变化较不明显。本文只给出了 4 种帧内预测模式相关性的变化情况,实验中其他 31 种帧内预测模式的相关性变化情况与给出的 4 种一致。



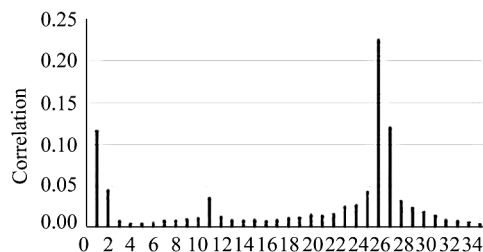
(a) The correlation statistics of prediction mode 0



(b) The correlation statistics of prediction mode 7



(c) The correlation statistics of prediction mode 17



(d) The correlation statistics of prediction mode 25

图 3 原始视频部分预测模式相关性统计

Fig. 3 Part of the prediction mode correlation statistics in original video

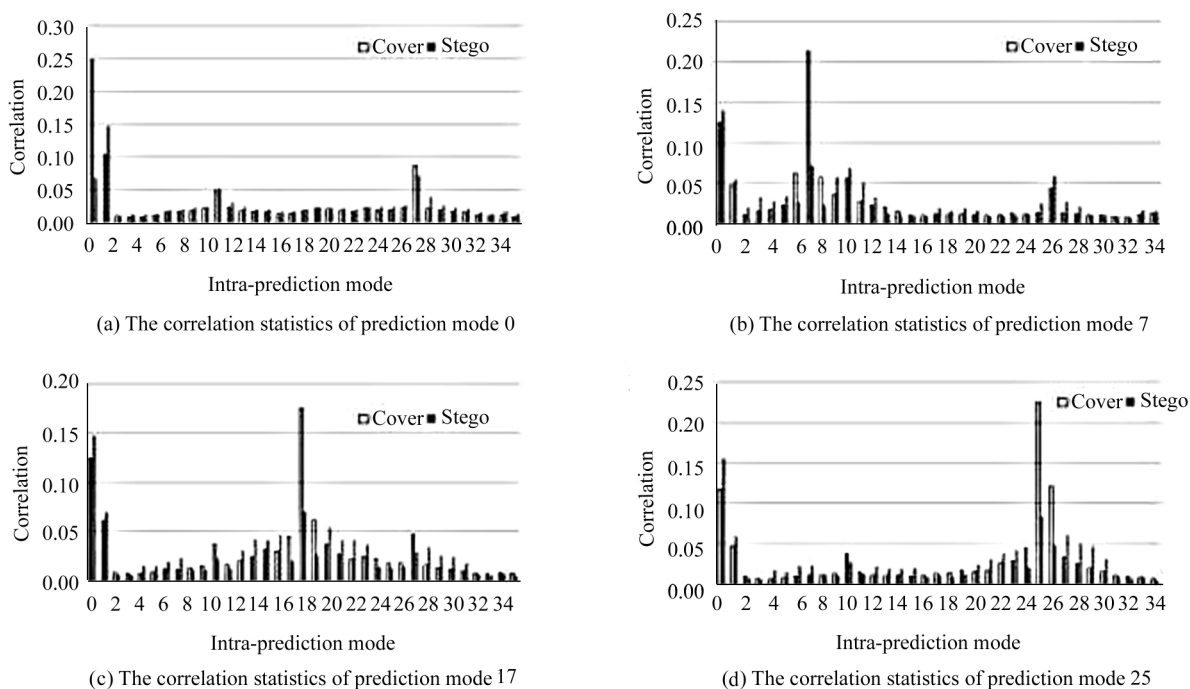


图4 隐写前后部分预测模式相关性统计

Fig. 4 Part of the prediction mode correlation statistics before and after steganography

4 隐写分析特征构造以及实验检测

修改帧内预测模式的信息隐藏算法破坏了原始预测模式相关性特征,最明显的是降低了预测模式与其自身的相关性($C_{(0-0)}$ 、 $C_{(1-1)} \cdots C_{(34-34)}$),如图5所示。因此可以根据预测式相关性数据的变化情况构造出隐写检测特征。特征构造步骤如下:

1) 提取视频序列 I 帧中的预测模式,并得到预测模式序列;

2) 由公式(2)计算 4×4 块预测模式相关性,得到 35×35 个预测模式相关性统计数据;

3) 选出其中 35 个相关性数据,即 $C_{(0-0)}$ 、 $C_{(1-1)} \cdots C_{(34-34)}$,构成一个视频样本的特征。

实验检测分为实验样本库的建立、特征的提取

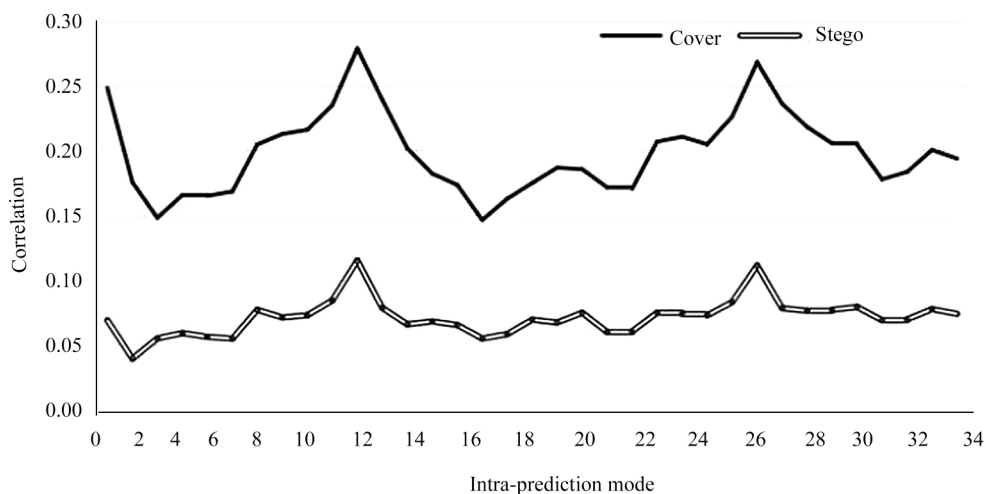


图5 隐写前后预测模式与其自身相关性变化情况

Fig. 5 The changes of prediction mode with its own correlation before and after steganography

以及用支持向量机(SVM)分类器^[18,19]计算检测率。样本库的构建如下:

首先,选取以下 yuv 格式视频,416×240 分辨率的 BasketballPass、BlowingBubbles、BQSquare、Flowervase 和 Mobisode,832×480 分辨率的 BasketballDrill、BasketballDrillText 和 BQMall、Flowervase,1024×768 分辨率的 ChinaSpeed,1280×720 分辨率的 Johnny、vidyo1、vidyo3 和 vidyo4,1920×1080 分辨率的 BasketballDrive。为了增加样本数量,对每一段视频进行裁剪,每 7 帧为一个视频段,一共得到 416×240 分辨率的视频段 630 帧(90 段),832×480 分辨率的视频段 630 帧(90 段),1024×768 的视频段 175 帧(25 段),1280×720 分辨率的视频段 840 帧(120 段),1920×1080 分辨率的视频段 105 帧(15 段),共 2380 帧(340 段),构成实验样本库。

采用文献[8]与文献[9]作为实验中的隐写算法。对于符合嵌入规则的 4×4 亮度块,两种隐写算法均是在连续的两个 4×4 亮度块中,修改一个 4×4 亮度块的预测模式为非最优预测模式,并实现两比特信息的嵌入。限于算法的规则,两种算法均为 100% 的嵌入信息。

首先,使用 HEVC 参考软件 HM 12.0 对实验样本进行压缩编码,生成原始视频文件。编码配置参数见表 1。

表 1 HM 平台配置参数

Tab. 1 The main configuration parameters of HM platform

Parameter	Configuration
Frame to be encode	7
Intra period	1
GOP size	1

这里为了获取更多的帧内预测模式数据,将 GOP(group of pictures)值设为 1,即将所有视频帧都作为 I 帧进行编码。提取原始视频帧内预测模式,并计算相邻 4×4 块预测模式相关性,提取 35 个相关性数据 $C_{(i-i)}$, $i \in [0, 34]$ 作为原始视频特征,得到 340 组原始视频相关性特征。分别用文献[8]和文献[9]对原始视频进行信息隐藏,提取预测模式并构造出两种载密视频的相关性特征。

目前尚未有针对 H. 265/HEVC 帧内预测模式隐写的检测算法,尝试将已有的 H. 264/AVC 中的检测算法移植到 H. 265/HEVC 中,并与本文算法进行对比以显示本文算法的有效性。文献[12]通过对

宏块采取横向、纵向、对角线以及斜对角线的扫描方式,提取 4×4 亮度块的不同预测模式序列,继而构造一阶和二阶 Markov 模型并作为特征。由于 H. 265/HEVC 采用可变大小的 CU 作为编码单元,一个 64×64 的 CTU 中划分出不同大小的 CU,因此文献[12]中对 4×4 亮度块预测模式的提取方法不适用于 H. 265/HEVC。但与文献[12]相比,本文所采用的特征维数低,计算复杂度大大降低。

在文献[13]中,首先提取视频每个 I 帧内亮度块的帧内预测模式,得到 N 维帧内预测模式向量(16×16 块看作 16 个 4×4 块,预测模式记为 10);再以相同参数重压视频,提取重压缩后每个 I 帧中的 N 维预测模式向量;最后利用重压缩前后得到的预测模式向量计算得到 10×10 的预测模式转移概率矩阵 P ,将 P 已光栅扫描顺序组成向量 V ,并作为视频特征。文献[14]算法移植到 H. 265/HEVC 中会有以下改动:将 8×8、16×16、32×32、64×64 块分别看做对应数量的 4×4 块,预测模式分别记作 35、36、37、38。其它部分按相同操作,得到 39×39 的预测模式转移概率矩阵,并得到 1521 维的视频特征向量 V 。本文将文献[13]的检测算法用于 H. 265/HEVC 中,并将实验结果与本文进行对比。

利用 SVM 分类器对实验获取的特征数据进行训练和检测,其中选取 50% 视频片段的特征数据用来训练,剩下的 50% 用来检测。分别对不同分辨率的视频序列进行测试,其中分辨率为 1024×768 和 1920×1080 的视频帧数较少,没有单独进行测试,而是在最后对所有视频序列组成的混合样本进行了测试。由于量化参数 QP 对编码精细度的影响, QP 越大视频中 4×4 块数量越少,从而影响隐写算法的嵌入容量,因此实验在不同的 QP 下进行,实验结果见表 2 和表 3。

同时,检测了两种算法提取测试视频序列特征所用时间。实验所用计算机配置为:Inter(R)-Core(TM)i3 CPU,主频为 3.2 GHz,内存为 64 位 Windows7,软件平台为 Matlab 2014a。实验中,分别对原始视频以及文献[8]算法生成的载密视频进行检测,分为不同分辨率测试序列的总花费时间/平均每段测试序列的花费时间,结果见表 4。

从表 2 和表 3 可以看出,本文算法对文献[8]和文献[9]的隐藏算法具有良好的检测效果,而且总体看,对分辨率较高的视频检测效果优于分辨率较低的视频。这是因为,高分辨率视频中 4×4 大小块数量更多,在隐写前后,由统计而得到的相关性数据差

异会更加明显。在不同的量化步长下,检测率会发生变化,在 QP 为 30 与 34 时,检测效果最好。本文只选取 5 种量化步长进行实验,实验数据有限,尚不能精确描述检测率与量化参数的关系,这些在后续工作中会继续进行研究。对于文献[13]的算法,虽

然检测率较低于本文算法,但也能有效的检测出隐写视频。从表 4 可以看出,随着视频分辨率的提高,提取视频片段特征所需时间也随之增加。与文献[13]相比,本文算法在特征提取上花费时间平均降低了 40~50%,有效降低了特征提取的复杂度。

表 2 针对文献[8]隐写算法的实验检测结果
Tab. 2 Detection results of the algorithm in Ref. [8]

Sequence	Accuracy/%									
	$QP=38$		$QP=34$		$QP=30$		$QP=26$		$QP=22$	
	Ours	Ref. [13]	Ours	Ref. [13]	Ours	Ref. [13]	Ours	Ref. [13]	Ours	Ref. [13]
416×240	98.52	88.33	100.00	86.89	100.00	90.56	98.87	91.23	99.89	85.56
832×480	100.00	94.72	100.00	92.64	100.00	93.89	100.00	96.44	98.84	96.67
1280×720	100.00	96.53	100.00	98.90	100.00	95.10	100.00	99.56	100.00	99.67
Hybird	98.37	91.47	98.24	89.18	98.59	90.89	97.76	93.82	96.69	90.59

表 3 针对文献[9]隐写算法的实验检测结果
Tab. 3 Detection results of the algorithm in Ref. [9]

Sequence	Accuracy/%									
	$QP=38$		$QP=34$		$QP=30$		$QP=26$		$QP=22$	
	Ours	Ref. [13]	Ours	Ref. [13]	Ours	Ref. [13]	Ours	Ref. [13]	Ours	Ref. [13]
416×240	97.78	90.56	99.56	87.44	100.00	87.44	100.00	93.10	100.00	94.44
832×480	100.00	95.82	100.00	91.89	100.00	92.22	100.00	97.22	99.11	97.78
1280×720	100.00	97.50	100.00	94.67	100.00	95.67	100.00	98.89	100.00	100.00
Hybird	99.17	92.35	99.12	90.65	99.53	93.24	98.18	94.78	97.65	93.53

表 4 特征提取耗时比较($QP=22$)
Tab. 4 The time consuming comparison
of feature extraction Unit:s

Sequence	Ours		Ref. [13]	
	Cover	Stego	Cover	Stego
416×240	15/0.167	13/0.144	25/0.278	27/0.300
832×480	56/0.622	52/0.578	93/1.030	98/1.090
1024×768	39/1.560	30/1.220	51/2.040	52/2.080
1280×720	153/1.270	150/1.260	301/2.510	300/2.500
1920×1080	47/3.130	40/2.670	79/5.270	80/5.330

5 结 论

针对 H.265/HEVC 修改帧内预测模式的信息隐藏算法,提出了一种基于帧内预测模式相关性的隐写检测算法。首先提取、计算视频序列 I 帧中 4×4 亮度块的预测模式相关性统计数据,然后从中选择 35 个相关性数据作为视频特征,最后用 SVM 分类器进行实验检测。实验表明,本文提出的检测算法特征维数少,复杂度低,对不同量化参数下的隐写视频都具有很好的检测效果。

参考文献:

[1] Lainema J, Bossen F, Han W J, et al. Intra Coding of the HEVC Standard[J]. Circuits & Systems for Video Technology IEEE Transactions on, 2012, 22(12): 1792-1801.

[2] WAN Shu-ai, YANG Fu-zheng. A new generation of high efficient video coding standard-H.265/HEVC: principle and implementation[M]. Peking: Publishing House of Electronics Industry, 2014.

[3] LI Song-bin, WANG Ling-rui, LIU Peng, et al. A HEVC information hiding approach based on motion vector space encoding[J]. Chinese Journal of Computers, 2015, 38(81): 1-15.

李松斌, 王凌睿, 刘鹏, 等. 一种基于运动矢量空间编码的 HEVC 信息隐藏方法[J]. 计算机学报, 2015, 38(81): 1-15.

[4] Van L P, De Praeter J, Van Wallendael G, et al. Out-of-the-loop information hiding for HEVC video[A]. Proc. of IEEE International Conference on Image Processing[C]. 2015, 3601-3614.

- [5] 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, 2013, **25**(2): 239-253.
- [6] Tew Y, Wong K S. Information hiding in HEVC standard using adaptive coding block size decision[A]. Proc. of IEEE International Conference on Image Processing[C]. 2014, 5202-5506.
- [7] WANG Jia-ji, WANG Rang-ding, LI Wei, et al. An information hiding algorithm for HEVC based on intra prediction modes[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2014, **25**(8): 1578-1585.
王家骥, 王让定, 李伟, 等. 一种基于帧内预测模式的 HEVC 视频信息隐藏算法[J]. 光电子 · 激光, 2014, **25**(8): 1578-1585.
- [8] WANG Jia-ji, WANG Rang-ding, XU Da-wen, 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.
- [9] XU Jian, WANG Rang-ding, HUANG Mei-ling, et al. A data hiding algorithm for HEVC based on the differences of intra prediction modes[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2015, **26**(9): 1753-1760.
徐健, 王让定, 黄美玲, 等. 一种基于预测模式差值的 HEVC 信息隐藏算法[J]. 光电子 · 激光, 2015, **26**(9): 1753-1760.
- [10] WANG Jia-ji, WANG Rang-ding, LI Wei, et al. Video information hiding in intra prediction and block codes for HEVC[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2015, **26**(5): 942-950.
王家骥, 王让定, 李伟, 等. HEVC 帧内预测模式和分组的视频信息隐藏[J]. 光电子 · 激光, 2015, **26**(5): 942-950.
- [11] DONG Xiao-hui, LIN Qi-wei, XU Dong-xu. An information hiding algorithm based on intra-prediction modes for HEVC[J]. Journal of Huaqiao University (Natural Science), 2015, (3): 275-279.
董晓慧, 林其伟, 许东旭. 一种采用内预测模式的 HEVC 视频信息隐藏算法[J]. 华侨大学学报: 自然科学版, 2015, (3): 275-279.
- [12] Li S, Deng H, Tian H, et al. Steganalysis of prediction mode modulated data-hiding algorithms in H. 264/AVC video stream[J]. Annals of Telecommunications-Annales des Télécommunications, 2014, **69**(7-8): 461-473.
- [13] KONG Wei-guo, WANG Hong-xia, WANG Ke-ren, et al. Steganalysis of intra-prediction mode modulated information hiding algorithms based on transition probability matrix for H. 264/AVC video[J]. Journal of Sichuan University (Natural Science Edition), 2014, **51**(6): 1183-1191.
孔维国, 王宏霞, 王科人, 等. 基于转移概率矩阵的 H. 264/AVC 视频帧内预测模式信息隐藏检测算法[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2014, **51**(6): 1183-1191.
- [14] Ohm J, Sullivan G J, Schwarz H, et al. Comparison of the coding efficiency of video coding standards—including high efficiency video coding (HEVC)[J]. IEEE Transactions on Circuits & Systems for Video Technology, 2012, **22**(22): 1669-1684.
- [15] 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 System For Video Technology, 2012, **22**(12): 1649-1668.
- [16] Yao Y, Li X, Lu Y. Fast intra mode decision algorithm for HEVC based on dominant edge assent distribution[J]. Multimedia Tools and Applications, 2016, **75**(4): 1963-1981.
- [17] LI Wei, WANG Rang-ding, WANG Jia-ji, et al. A fast intra coding algorithm with low complexity for HEVC[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2015, **26**(3): 597-604.
李伟, 王让定, 王家骥, 等. 一种低复杂度的 HEVC 帧内快速编码算法[J]. 光电子 · 激光, 2015, **26**(3): 597-604.
- [18] Chang Chih-chung, Lin Chin-jen. LIBSVM: A Library for support vector machines [CP/OL]. <http://www.csie.ntu.edu.tw/~cjlin/libsvm>, 2001.
- [19] Faruto, Liyang. LIBSVM-farutoUltimateVersion, a toolbox with implements for support vector machines based on libsvm[CP/OL]. <http://www.matlabsky.com>, 2011.

作者简介:

王让定 (1962—), 男, 甘肃省天水市人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事信息隐藏、数字取证和数字水印等方面的研究。