# 基于熵编码的立体视频加密与信息隐藏算法

高 巍<sup>①2</sup> 蒋刚毅<sup>\*①</sup> 郁 梅<sup>①</sup> 骆 挺<sup>①2</sup> <sup>①</sup>(宁波大学信息科学与工程学院 宁波 315211) <sup>②</sup>(宁波大学科学技术学院 宁波 315211)

**摘 要:**针对立体视频的安全性,该文提出一种基于熵编码的立体视频加密与信息隐藏算法。首先,结合立体视频编码结构,分析误差漂移的物理机制,并根据立体视觉掩蔽效应,确定左右视点的加密帧和隐秘信息待嵌入帧。其次,在基于上下文自适应二进制算术编码(CABAC)的熵编码中,通过等长码字替换技术,实现立体视频的加密和信息隐藏。实验结果表明,视频码流经加密与信息隐藏之后格式兼容、比特率不变,视频感知质量无明显下降,在计算复杂度和码率增加率上有显著优势。

关键词: 立体视频编码; 分层次B帧预测; 隐秘域信息隐藏; 熵编码

中图分类号: TN911.73; TP391 文献标识码: A 文章编号: 1009-5896(2020)09-2158-08 DOI: 10.11999/JEIT190345

# A Steganography Algorithm in Encrypted Stereoscopic Video Based on Entropy Coding

GAO Wei<sup>①②</sup> JIANG Gangyi<sup>①</sup> YU Mei<sup>①</sup> LUO Ting<sup>①②</sup>

<sup>①</sup>(Faculty of Information Sciences and Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China) <sup>②</sup>(College of Science and Technology, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

**Abstract**: For security of stereoscopic video, a video encryption and information hiding algorithm based on entropy coding is proposed. Firstly, with the analysis of Multi-view Video Coding (MVC), the physical mechanism of error drift is investigated. By applying the stereoscopic masking effect, the frames to be encrypted and the frames to be embedded are determined. Secondly, by using a Context-based Adaptive Binary Arithmetic Coding (CABAC) bin-string substitution technique, the encryption and data hiding of stereoscopic video are implemented. Experimental implementation reveals that the video stream has the format compatibility and the bit-rate remains unchanged after encryption and data hiding. The video quality degradation is negligible. The algorithm has significant advantages in computational complexity and rate increase. **Key words**: Stereoscopic video; Hierarchical B Picture (HBP); Data hiding in encrypted domain; Entropy coding

## 1 引言

视频显示技术已从2D发展到3D立体<sup>[1]</sup>,在为 用户提供沉浸式视觉感知的同时,也产生了立体视 频内容的安全性、真实性及知识版权保护等新问 题。如何提供针对3维视频的信息隐藏解决方案<sup>[2]</sup>, 成为促进立体视频技术应用而需要解决的难题。另 一方面,随着移动互联网和云存储的快速发展,为

收稿日期: 2019-05-16; 改回日期: 2020-03-20; 网络出版: 2020-07-01 \*通信作者: 蒋刚毅 jianggangyi@126.com

基金项目:国家自然科学基金(61671258,61871247,61931022,61971247)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61671258, 61871247, 61931022, 61971247) 满足数据安全和隐私保护的需要,敏感视频数据在 完成压缩编码之后会以加密方式存储和分发。而数 据管理员,如云服务提供商,则出于篡改检测、所 有权声明或版权管理目的,需要将一些附加消息, 如标记、认证数据或所有者身份信息等嵌入到加密 视频中,这被称为加密域的信息隐藏<sup>[3]</sup>。由于加密 数据不同于原始数据,也给传统的信息隐藏方法增 加了难度。

本文研究的是立体视频的加密域信息隐藏。目前国内外立体视频的加密域信息隐藏相关研究还比较缺乏,已有的研究主要集中在单纯的信息隐藏领域。如Song等人<sup>[4]</sup>提出在3D多视点编码(Multi-View Coding, MVC)结构的B4帧中,利用运动矢量残差

(Motion Vector Difference, MVD)或非零量化变换 系数(Quantized Transform Coefficients, QTC)<sup>5</sup>来 隐藏秘密数据。但由于B4帧存在大量不携带参数 的SKIP宏块,因此算法实际可嵌入容量偏小。 Li等人<sup>6</sup>提出了利用矩阵编码与无数据量扩大秘密 共享技术的立体视频水印方法。王静<sup>[7]</sup>提出了3D-HEVC帧间信息隐藏算法,利用立体显著模型调制 量化参数(Quantization Parameter, QP)来嵌入隐 秘信息。Shafai等人<sup>®</sup>提出了针对3D视频的混合水 印算法,分别嵌入在小波变换域和余弦变换域中。 这3个算法[6-8]或需要事先记录视点间参考信息,或 需要重编码,均不适合有实时性要求的场合,比如 视频广播, IP-TV和数字影音。Zhao等人<sup>99</sup>提出了 针对立体视频的新颖3维直方图移位算法,算法具 有优越的有效载荷失真性能,但没有探讨立体编码 中的帧间失真漂移问题。

本文结合立体视频编码标准,提出一种基于上下文自适应二进制算术编码(Context-based Adaptive Binary Arithmetic Coding, CABAC)的立体视频加密与信息隐藏算法。利用了分层次B帧预测 (Hierarchical B Picture, HBP)的编码结构特点, 并根据双视点的立体掩蔽效应,通过熵编码的等长 码字替换技术,实现立体视频的加密和信息隐藏。 在不影响立体视频感知质量的前提下,维持了立体 视频码流的比特率,而隐藏信息可以选择在加密域 或者解密域提取,以适用不同的应用场合。

# 2 基于CABAC熵编码的立体视频加密与 信息隐藏算法

本文提出的算法框架如图1,图2所示。图1 中,在对H.264或HEVC标准编码的立体视频码流 进行熵解码之后,通过操作运动矢量残差(MVD) 和非零变换系数(QTC)的符号位,实现视频加密。 而后对采用指数哥伦布编码的MVD后缀部分,应 用二进制串码字等长替换方法,实现信息隐藏。加 密和信息隐藏都在CABAC旁路编码模式下完成, 视频管理者可以直接在加密的视频中嵌入认证或标 记信息,即便未被授权查看原始视频内容。这将解 决视频内容安全和隐私保护相冲突的问题。图2所 示为嵌入信息的提取,可根据应用场景不同选择在 加密域或解密域中进行,为隐藏的逆过程。

#### 2.1 立体编码结构的分析与嵌入帧的选择

图3所示为基于分层次B帧预测(Hierarchical B Picture, HBP)的立体视频编码结构,被纳入MPEG



图 2 立体视频加密域或解密域中的信息提取框图

的编码标准草案。箭头的方向表示编码帧所对应的 参考帧。I表示帧内预测编码帧,P帧为单向帧间/ 视点间预测的编码帧,I/P帧(白/灰色)组成了图像 组(Group Of Pictures, GOP)的关键帧,GOP中的 其余帧为B帧编码方式。B帧采用双向预测,在 HBP预测结构中B帧参考比其自身层数低的B帧。 从该图中可知,立体视频编码在保证时域压缩的同 时引入了视点间预测,因此比起单视点视频编码进 一步提高了压缩效率。

由于H.264/HEVC视频编码标准在编码过程中 使用了预测过程来提升编码效率,这使得在压缩域 中的微小改变将造成误差漂移,并且会不断传播和 累加起来,从而引起明显的视频失真。文献[6]提出了 针对HBP预测结构的误差漂移级数概念。如图3所 示, 数字0~3分别表示对应的漂移级数。级数值越 大,漂移程度越低。B4帧因不被其他编码帧参 考,故不在漂移级数之列,可作为信息隐藏的首选 嵌入空间。左视点的B3帧,因其被右视点参考的 比例较低,且漂移级数靠后,也可作为信息隐藏嵌 入域。而右视点B3帧, 虽会影响右视点B4帧的参 考,但人类视觉系统特性的研究表明[10],双通道的 合成视觉质量由其中质量好的通道决定,这被称为 立体掩蔽效应。而采用左右通道不对称的信息隐藏 嵌入方式,可利用立体掩蔽效应进一步挖掘立体感 知冗余,从而获得更好的信息隐藏性能。综合上述 因素,本文算法选择左视点B3帧与右视点的B3和 B4帧作为隐秘信息的嵌入域。

#### 2.2 CABAC熵编码下的加密与信息隐藏

H.264/AVC标准的熵编码可采用基于上下文 的自适应二进制算术编码(CABAC),而高效视频 编码(HEVC)标准的熵编码唯一采用CABAC技 术。CABAC熵编码过程分为语法元素二进制化, 以及二进制比特流(bins)算术编码两个步骤。其中 算术编码又分为基于上下文模型的常规算术编码和 采用近似等概率模型的旁路算术编码。

#### 2.2.1 CABAC熵编码下的视频加密

在CABAC 熵编码中,使用旁路编码模式的语

法元素包括DCT变换后非零量化系数QTC的符号 位,以及帧间预测时运动矢量残差MVD的符号 位。改变这两者的符号位可对解码端的视频重建产 生明显的感知扰乱效应,但对码流结构不产生任何 影响。为保护视频纹理信息和运动信息,本文算法 将同时加密QTC和MVD的符号位。

#### 2.2.2 CABAC熵编码下的信息隐藏

由于信息隐藏应用于己加密的视频中,数据嵌入 不应影响己加密的QTC和MVD符号位。本算法选取 运动矢量残差MVD的二值化串(bins)作为信息隐藏域。

(1) MVD的选取: MVD绝对值(幅值)的二值 化采用的是UEGK(Unary/Kth order Exp-Golomb)二值化方案。生成的序列由前缀和后缀两 部分串接而成,即

 $y(x) = f_{c} \left( f_{TU} \left( \min(\text{Ucoff}, \text{abs}(x)) \right) + f_{EGK} \left( x - \text{Ucoff} \right) \right)$ (1)

式中y(x)表示语法元素x的UEGK二值化序列,它 含经截断码TU二进制化得到前缀部分和经k阶指数 哥仑布编码(EGK)得到的后缀部分。式中Ucoff为 UEGK的截断值, $f_c(\cdot)$ 函数实现前缀和后缀部分的 串接。对于给定的变量t,k阶指数哥仑布编码计算 如式(2)所示,它包括经一元码转换函数 $f_u(\cdot)$ 得到 的前缀部分,和经二进制转换函数 $f_b(\cdot)$ 得到的后缀 部分。

$$l(t) = \left\lfloor \log_2(t/2^k + 1) \right\rfloor f_{EGK}(t) = f_c \left( f_u(l(t)) + f_b \left( t + 2^k (1 - 2^{l(t)}) \right) \right)$$
(2)

MVD幅值使用截断值为9,阶数为3的UEG3 二值化方案。表1显示了MVD幅值对应的二值化串 (bins)。当|MVD|≥9时,每两个相邻的二进制串可 以形成长度相同的匹配对。而MVD|≥9时,其基于 EG3编码的后缀部分采用旁路编码模式。

同时,MVD幅值的前缀采用常规编码模式,即需要计算上下文索引(ctxIdx)以选择上下文模型。而ctxIdx值受制于上下文索引增量ctxIdxInc,对于|MVD|二值化串的第1个比特位,ctxIdxInc推导如式(3)



图 3 立体视频编码中的HBP预测结构和误差漂移级数

(3)

式中A和B是当前块左侧和上方的邻块,|mvd(A, cmp)|和|mvd(B, cmp)|表示方向cmp∈{水平,垂直}的MVD分量的绝对值。根据式(3),大于32的|MVD|值改变,因ctxIdxInc=2,而不影响后续块|MVD|的前缀部分上下文模型。为此,根据表1将|MVD|>32的二进制串分成空间C0和C1,如表2所示。通过C0和C1中的二进制串互为替换可实现数据的嵌入。

假设要嵌入的信息为使用密钥加密之后的二进 制序列M= $\{m_1, m_2, \dots, m_i\}, m_i \in [0, 1], 如果当前$ MVD幅值属于空间C0或C1,则可通过二进制串替 $换嵌入<math>m_i$ 信息

$$|\text{mvd}|_{e} = \begin{cases} |\text{mvd}|, & m_{i} = = 0\&\&|\text{mvd}| \in C0\\ |\text{mvd}|_{p}, m_{i} = = 1\&\&|\text{mvd}| \in C0\\ |\text{mvd}|, & m_{i} = = 1\&\&|\text{mvd}| \in C1\\ |\text{mvd}|_{p}, m_{i} = = 0\&\&|\text{mvd}| \in C1 \end{cases}$$
(4)

式中 $|mvd|_e$ 为嵌入隐秘信息之后的二进制串,  $|mvd|_p$ 是与当前|mvd|配对的二进制串。相同长度

abs(MVD)	Bin-string				
	TU prefix	EG3 suffix			
0	0				
:	:				
8	111111110				
9	111111111	0000			
10	111111111	0001			
÷	÷	:			
17	111111111	100000			
18	111111111	100001			
÷	÷	:			
33	111111111	11000000			
34	111111111	11000001			
•	:	•			

表 1 CABAC下MVD幅值的UEG3二值化串

表 2 MVD幅值的二进制串对

С	0	C	1
abs(MVD)	EG3	abs(MVD)	EG3
33	110 00000	34	110 00001
35	$110\ 00010$	36	110  00011
÷	•	÷	:

的二进制串替换,维持了网络抽象层单元的长度 不变。

(2)宏块分割的选择:H.264和HEVC帧间运动 估计时都支持编码单元多分割预测模式,以 H.264为例,每个16×16的宏块可以被划分成4种尺 寸的分割块,即16×16,16×8,8×16和8×8。为分 析数据嵌入在不同的宏块分割中对视频质量的影 响,通过实验分别统计了16×16,16×8和8×16, 8×8分割情况下修改|MVD|造成的视觉质量衰减程 度,如图4所示。

为排除帧间漂移的干扰,实验选用单视点的 IBPBI编码结构,视频质量评价指标选用峰值信噪 比PSNR,图4中ΔPSNR。定义为

$$\Delta PSNR_{e} = \frac{PSNR_{H.264} - PSNR_{e}}{C_{e}}$$
(5)

这里*C*<sub>e</sub>代表数据嵌入容量,单位bit。从图中可 知,16×16的分割相比其它两种情况,PSNR衰减 幅度更大,这是因为首先,MVD的修改如果作用 在越大的分割尺寸上,该分割重建之后产生的视觉 失真范围也越大。其次,H.264采用运动矢量预测 技术,用邻近已编码块来预测出当前编码块的MV 来进一步降低传输码率。越大的分割尺寸,其被临 近宏块/子宏块作为参考块的可能性也越大。

综合嵌入容量和视觉失真的权衡,本文算法在 左视点的B3帧和右视点的B4帧,选择所有4种子宏 块分割进行数据嵌入,而在帧间漂移影响较大的右 视点B3帧中,数据嵌入域排除了16×16分割。

#### 2.3 算法提出

本文提出一种在加密的立体视频中的信息隐藏 算法,其中为提高数据嵌入的安全性,可采用输出 反馈模式 (OFB)的AES加密对隐秘信息先行预处理。 2.3.1 视频加密

在基于HBP预测结构的立体视频编码中,每 一个GOP内编码顺序为IPIPBBBB...,其中I帧和 P帧是后续B帧编码的基础,加密算法将作用于所 有视频帧中。具体步骤如下:



图 4 不同子宏块的数据嵌入对B帧视频质量影响(Akko&Kayo)

 $R = \{r_1, r_2, \cdots, r_i\}, r_i \in [0, 1]_{\circ}$ 

步骤 2 通过熵解码,获得原始立体视频码流 的二进制串。

步骤3 将非零QTC符号位 $S_{\text{QTC}_i}$ 和非零MVD 符号位 $S_{\text{MVD}_i}$ 的二进制串进行比特异或运算,得 到加密后的 $S'_{\text{QTC}_i}$ 和 $S'_{\text{MVD}_i}$ 

$$\left.\begin{array}{l}S'_{\text{QTC}_{-i}} = S_{\text{QTC}_{-i}} \oplus r_{i}\\S'_{\text{MVD}_{-i}} = S_{\text{MVD}_{-i}} \oplus r_{i}\end{array}\right\}$$
(6)

步骤 4 将修改的二进制串进行熵编码。

步骤 5 重复步骤3-步骤5,直至视频码流结 束,获得加密域的立体视频。

2.3.2 数据嵌入

在己加密的立体视频码流中,根据2.2.2节选择 嵌入域。步骤如下:

步骤 1 利用嵌入密钥对隐秘信息进行AES-OFB模式加密处理,得到待嵌入的二进制序列  $M=\{m_1, m_2, \dots, m_i\}, m_i \in [0, 1]$ 。

步骤 2 通过熵解码,获得加密的立体视频码 流的二进制串。

步骤 3 在一个GOP内,如果视点为0,选择 B3帧。如果视点为1,选择B3帧和B4帧,并排除 B3帧中16×16分割。然后,对于其中|MVD|>32, 依据式(4),依据待嵌入的隐秘信息*m*<sub>i</sub>值,对|MVD| 作二进制串替换。

步骤 4 将替换过的二进制串进行熵编码。

步骤 5 重复步骤2-步骤4,直至数据嵌入完 毕,得到了含有隐秘信息的加密域立体视频。

#### 2.3.3 数据提取

数据提取根据不同的应用场景,也可分为加密 域提取和解密域提取两种独立的情况。

(1)加密域的数据提取:为保护隐私,某一 级别的视频管理员可能仅拥有数据嵌入密钥并且 必须在加密域中提取数据以跟踪视频来源。在这 种情况下,加密视频被直接用来提取数据,步骤 如下:

步骤 1 通过熵解码,获得含隐秘信息的加密 立体视频码流的二进制串。

步骤 2 同数据嵌入步骤3,步骤4的筛选条件,识别对应B帧中大于32的|MVD|,则有





(a) Akko&Kayo

(b) Ballroom



(c) Exit

# (d) Vassar



(e) Flamenco

图 5 测试序列快照 (左视点第1帧)

$$m_i = \begin{cases} 1, & |\text{MVD}| \in \text{C1} \\ 0, & |\text{MVD}| \in \text{C0} \end{cases}$$
(7)

其中, *m*<sub>i</sub>是提取的隐秘信息, 其可以根据嵌入密 钥进一步解密来提取原始隐藏信息。

(2) 解密域的数据提取:在另一类场景下<sup>[11]</sup>, 拥有加密密钥的授权用户需使用加密密钥对接收的 视频先进行解密。而仍然包含隐秘信息的解密视 频,则可进一步提取数据用于跟踪视频来源,其步 骤如下:

步骤 1 采用与加密步骤3相同的步骤,利用 异或运算的可逆性,对接受的视频码流进行解密, 恢复原始S<sub>QTC\_i</sub>和S<sub>MVD\_i</sub>,获得解密的含隐秘信息 的立体视频码流;

步骤 2 解码域的数据提取,操作过程和加密 域的数据提取相同,具体步骤不再赘述。

#### 3 实验结果及分析

本文提出的算法在H.264/AVC的参考软件 JM18.5上进行仿真,实验中所用立体测试序列如 图5所示。分辨率为640×480,帧率为30 fps,具有 不同的场景和运动,以代表实际应用中的各种情 况。编码的帧结构如图3所示,实验编码12个 GOP,共96帧。JM软件的编码配置参数: Intra周 期为8, IDR周期为16, QP(I,P,B)为(18,18,20),其 余为默认值。

#### 3.1 视频加密

实验通过间隔修改QTC和MVD符号位的方 式,观察视频加密算法对视频的视觉扰乱效果,由 于左右视点效果差别不大,图6仅选取了左视点来 观察加密后的主观效果。从图6可知,加密后的视 频具有较明显的不可辨识性。其中QTC的加密对 静态纹理背景扰乱效果较好,而MVD的加密对动 态物体的扰乱更明显。

图7列出了5个不同的测试序列在加密前后的PSNR 变化,PSNR值越小,表示视频质量衰减越大。加 密前后,PSNR从40 dB以上大幅度下降到10 dB左 右,一定程度上反映了显著的视觉扰乱效果。

#### 3.2 信息隐藏

在立体视频可嵌入域中,间隔修改MVD幅值 的二进制串,观察在最大数据嵌入容量下算法对立

2163

体编码性能的影响;具体考察视频质量评价、数据 嵌入容量和比特率变化等指标。

(1) 视觉质量评价:实验统计了各个立体视频 序列数据嵌入前后的PSNR变化,限于篇幅,本文 列出了5个测试序列中PSNR衰减最大的 Akko&Kayo序列,如图8所示。嵌入前后左视点 PSNR没有明显的下降, 而右视点则有了一定程度 的衰减,96帧平均PSNR衰减为0.4352 dB,局部最 大达到1.3 dB。这是因为左视点仅在B3帧上嵌入隐 秘信息,而右视点嵌入在B3和B4帧。并且B4帧同 时受帧间和视点间失真漂移的影响,重建的图像存 在更大失真的概率。

根据Wang等人<sup>[12]</sup>研究得出的立体掩蔽效应, 对于立体图像,当右视点的PSNR值比左视点低 2 dB, 且左视点图像PSNR值在32 dB以上时, 相 比较左右视点质量相同的立体图像,主观感知上无 明显差别。本算法尽可能维持了左视点的保真度。 同时,在图8中对比左右视点,会发现右视点重建 帧即便在极端情况下, PSNR的下降也没有超过 2 dB,因此方案的数据嵌入并没有实际造成立体视 频感知质量的下降。

为评估信息隐藏算法的性能,除了PSNR,还 引入结构相似度(Structural SIMilarity, SSIM)<sup>[13]</sup> 和视频质量度量(Video Quality Measurement techniques, VQM)<sup>[14]</sup>两个客观评价指标。实验结果 如表3所示。

从表3中可知,测试序列在嵌入数据之后SSIM 值仍维持在0.95之上,而VQM值在数据嵌入前后 的变化也较小,可见嵌入信息对视频质量影响不 大。而从人眼实际视觉观察来看,隐藏信息的视频 帧和原始视频帧也几乎无差别,这确保了信息隐藏 的透明度。

(2) 数据可嵌入容量:实验分别统计了各个立 体测试视频序列的可嵌入隐秘信息容量,并用嵌入 比特数表示。12个GOP的总嵌入容量可见表3,图 9所示为各序列的嵌入容量对比。其嵌入容量的差 异是由测试序列不同画面内容所决定。背景变化较 快的视频片段,相比较背景变化缓慢的视频片段, 可产生更多符合数据嵌入条件的MVD。由于本算 法是在视频压缩域嵌入数据,受视频编码高压缩率 的约束,数据可嵌入空间小,因此和传统的信息隐 藏方案相比,本算法可嵌入容量不占优势,但考虑





(b) Ballroom

(c) Exit



表 3 各立体测试序列数据嵌入前后视频质量评价指标

							-	
<b>皮</b> 利 対	하며 난	出)会具(1・1)	PSNR		SSIM		VQM	
序列	优点	嵌入谷里(bit)	标准编码	本文算法	标准编码	本文算法	标准编码	本文算法
Akko&Kayo	0	1555	44.98	44.90	0.9879	0.9879	0.5179	0.5357
	1	3241	45.13	44.67	0.9884	0.9881	0.5262	0.6221
Ballroom	0	3534	42.33	42.27	0.9805	0.9805	0.7553	0.7862
	1	5777	42.07	41.86	0.9793	0.9790	0.7567	0.8594
Exit	0	620	42.36	42.36	0.9673	0.9673	0.8138	0.8146
	1	2136	42.26	42.20	0.9663	0.9661	0.8264	0.8660
Vassar	0	492	41.89	41.88	0.9657	0.9657	0.7802	0.7865
	1	1087	41.82	41.77	0.9644	0.9643	0.7910	0.8273
Flamenco	0	1300	44.87	44.86	0.9871	0.9871	0.5892	0.5953
1 minelieo	1	4905	45.41	45.10	0.9882	0.9881	0.5458	0.5937



图 9 各立体测试序列可嵌入数据容量

到实际应用中,不同于图像,视频具有连续多帧播 放的特点,因此事实上视频的可嵌入容量一般都大 于可满足的水平。

(3) 比特率变化:为评价信息隐藏算法对码率 产生的影响,引入比特率变化率(BIR),定义为

$$BIR = \frac{BR_e - BR_o}{BR_o} \times 100\%$$
(8)

其中,BR。与BR。分别表示数据嵌入前后的视频流 比特率。本算法如2.2.节所述,无论是加密还是数 据嵌入,视频的比特率都保持不变。

#### 3.3 算法比较

针对前述的几个立体测试序列,分别选取了文 献[4]和文献[9]算法作比对实验。表4给出了3个算法 的性能对比数据。表4中PSNR由统计两个视点所 有帧的平均值得到,总体上3个算法的PSNR都比 较接近。图10中统计了每个算法相比H.264/AVC 编码的视频质量衰减值ΔPSNR。文献[9]算法选取 了其文中所提的B<sub>4</sub>-interMB方案,并嵌入同本文算 法相同的数据容量作对比。从图10中观察,其 ΔPSNR较小。而文献[4]满足其可嵌入条件的容量 少,因此ΔPSNR也比本文方法低。但从图10可知, 本算法与另两者算法差别仍在可接受的范围。

各算法的最大可嵌入数据容量如图11所示。其 中,文献[4]容量最低。需要说明的是,文献[9]虽然 具有比其他算法更高的嵌入容量,但当嵌入容量超 过1000 bit时,PSNR已经低于38 dB,出现明显的 视觉质量下降。图12所示为各算法比特率变化率 BIR。本算法保持码率不变,另外两个算法改变的 语法元素值,都将影响熵编码时上下文,从而增加 码流比特率。其中文献[9]的BIR最大。

### 4 结论

本文提出了一种基于熵编码CABAC的立体视 频加密与信息隐藏算法。采用本算法可实现在不影 响视频机密性的前提下对视频进行后期管理和版权 标注。隐藏信息的提取可选择在加密域或解密域中

表 4 本文方法与文献[4]和文献[9]的性能对比

序列 一		$\mathrm{PSNR}(\mathrm{dB})$			数据可嵌入容量(bit GOP)			${ m BIR}( imes 10^{-5})$		
	文献[4]	文献[9]	本文	文献[4]	文献[9]	本文	文献[4]	文献[ <mark>9</mark> ]	本文	
Akko&Kayo	44.903	45.012	44.788	122	1341	400	13.468	56.146	0.000	
Ballroom	42.105	42.116	42.067	136	1700	776	12.831	71.329	0.000	
Exit	42.282	42.243	42.280	114	1556	230	13.694	59.004	0.000	
Vassar	41.832	41.788	41.826	96	1802	132	18.244	59.786	0.000	
Flamenco	45.017	45.024	44.982	154	1211	517	17.344	51.969	0.000	
Crowd	42.885	42.983	42.743	133	1693	425	17.682	59.682	0.000	



图 10 本文方法与文献[4]和文献[9]的ΔPSNR比较



图 11 最大可嵌入数据容量对比(bit GOP)



图 12 各算法的比特率变化率BIR (×10-5)

分别进行,以适合不同的使用场景。实验结果表明,本文算法在维持立体视频码流不变和格式兼容的前提下,未因信息隐藏而引起显著的视频质量下降,具有计算复杂度低,码率稳定性好,实时性强的特点。算法同样适用于3D-HEVC视频加密与信息隐藏。

#### 参考文献

- WIEN M, BOYCE J M, STOCKHAMMER T, et al. Standardization status of immersive video coding[J]. IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems, 2019, 9(1): 5–17. doi: 10.1109/JETCAS.2019. 2898948.
- [2] GAO Wei, JIANG Gangyi, YU Mei, et al. Lossless fragile watermarking algorithm in compressed domain for multiview video coding[J]. Multimedia Tools and Applications, 2019, 78(8): 9737–9762. doi: 10.1007/s11042-018-6538-8.
- [3] XU Dawen, WANG Rangding, and ZHU Yani. Tunable data hiding in partially encrypted H. 264/AVC videos[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2017, 45: 34–45. doi: 10.1016/j.jvcir. 2017.02.008.

- [4] SONG Guanghua, LI Zhitang, ZHAO Juan, et al. A reversible video steganography algorithm for MVC based on motion vector[J]. Multimedia Tools and Applications, 2015, 74(11): 3759–3782. doi: 10.1007/s11042-013-1798-9.
- [5] SONG Guanghua, LI Zhitang, ZHAO Juan, et al. A data hiding algorithm for 3D videos based on inter-MBs[C]. The 10th International Conference on Intelligent Computing Theory, Taiyuan, China, 2014: 541–552. doi: 10.1007/978-3-319-09333-8\_60.
- [6] LI Wenfeng, JIANG Gangyi, and LUO Ting. A watermarking algorithm for 3D videos stream based on spatiotemporal correlation[C]. 2015 International Conference on Intelligent Systems Research and Mechatronics Engineering, Zhengzhou, China, 2015: 680–688. doi: 10.2991/isrme-15.2015.136.
- [7] 王静. 三维视频信息隐藏技术及其应用研究[D]. [硕士论文], 宁波大学, 2017.
   WANG Jing. The research of three-dimensional video information hiding technology and its application[D].
   [Master dissertation], Ningbo University, 2017.
- [8] EL-SHAFAI W, EL-RABAIE S, EL-HALAWANY M M, et al. Efficient hybrid watermarking schemes for robust and secure 3D- MVC communication[J]. International Journal of Communication Systems, 2018, 31(4): e3478. doi: 10.1002/ dac.3478.
- ZHAO Juan and LI Zhitang. Three-dimensional histogram shifting for reversible data hiding[J]. *Multimedia Systems*, 2018, 24(1): 95–109. doi: 10.1007/s00530-016-0529-2.
- [10] SHAO Feng, LI Kemeng, LIN Weisi, et al. Using binocular feature combination for blind quality assessment of stereoscopic images[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2015, 22(10): 1548–1551. doi: 10.1109/LSP.2015.2413946.
- [11] XU Dawen, WANG Rangding, and SHI Y Q. Data hiding in encrypted H. 264/AVC video streams by codeword substitution[J]. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2014, 9(4): 596–606. doi: 10.1109/TIFS. 2014.2302899.
- [12] WANG X, JIANG G Y, ZHOU J M, et al. Visibility threshold of compressed stereoscopic image: Effects of asymmetrical coding[J]. The Imaging Science Journal, 2013, 61(2): 172–182. doi: 10.1179/1743131X11Y.0000000035.
- [13] WANG Zhou, BOVIK A C, SHEIKH H R, et al. Image quality assessment: From error visibility to structural similarity[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, 13(4): 600–612. doi: 10.1109/TIP.2003.819861.
- [14] XIAO Feng. DCT-based video quality evaluation[R]. Final Project for EE392J, 2000.

高 巍: 男, 1969年生, 博士生, 讲师, 研究方向为3D视频信息隐藏.

- 蒋刚毅: 男,1964年生,博士,教授,博士生导师,研究方向为多 媒体信号处理与通信、3D视频系统编码与传输、图像与 视频质量评价、信息隐藏.
- 郁 梅:女,1968年生,博士,教授,博士生导师,研究方向为多 媒体信号处理与通信研究.
- 骆 挺: 男, 1980年生, 博士, 副教授, 研究方向为多媒体信息隐藏.

责任编辑:陈 倩