

# 视频隐写分析技术研究综述

张 弘<sup>1,2</sup>, 尤玮珂<sup>1,2</sup>, 赵险峰<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> 中国科学信息工程研究所 信息安全国家重点实验室, 北京 中国 100093

<sup>2</sup> 中国科学院大学 网络空间安全学院, 北京 中国 100049

**摘要** 作为当今最流行的传播媒介之一, 数字视频被普遍视为一种理想的隐蔽通信载体, 视频隐写和视频隐写分析技术也因此吸引了信息隐藏领域研究者的广泛关注, 成为该领域的研究热点之一。近年来, 视频隐写技术的快速发展, 使得视频隐写分析面临着巨大的挑战。本文对当前视频隐写分析领域的研究现状进行了综述概括, 重点阐述了关于压缩域视频隐写分析技术的研究进展。针对不同类型的嵌入域, 分别归纳了相应隐写分析技术的原理, 并对其中的经典方法进行了详细介绍和分析。此外, 还对未来视频隐写分析领域可能的研究重点和发展方向进行了讨论和展望。

**关键词** 信息隐藏; 视频隐写分析; 视频编码; 隐写

中图分类号 TP391 DOI号 10.19363/J.cnki.cn10-1380/tn.2018.11.02

## A Survey of Video Steganalysis

ZHANG Hong<sup>1,2</sup>, YOU Weike<sup>1,2</sup>, ZHAO Xianfeng<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Information Security, Institute of Information Engineering,  
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China

<sup>2</sup>School of Cyber Security, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** Digital video has become one of the most influential media, and video transmission is widely believed to be an ideal cloak for covert communication. Thus, video steganography and steganalysis have received much attention from the research community and become a hot research topic in the field of information hiding. In recent years, the rapid development of video steganographic techniques has posed a serious challenge to video steganalysis. In this article, the progress of research on video steganalysis is surveyed, and the steganalytic techniques in compressed video domain are graphically illustrated. The basic principles of specific video steganalysis targeted at different embedding domains are explained, with the elaboration of some representative methods. In addition, the future direction of video steganalysis is further discussed.

**Key words** information hiding; video steganalysis; video coding; steganography

## 1 引言

信息化时代极大推动了计算机技术和网络通信技术的发展, 同时也给古老的信息隐藏(Information Hiding)技术注入了新的活力, 使其逐步演化成为一门集多学科理论和技术于一身的新兴技术。一般地, 信息隐藏技术利用了载体对象的冗余特性, 将一段有意义的信息嵌入其中, 得到载密对象。由于非授权者难以检测、提取和去除载密对象中隐藏的信息, 因而通过信息隐藏技术能够达到隐蔽通信和版权保护等目的。现代信息隐藏技术主要包括隐写(Steganography)、数字水印(Digital Watermarking)和

隐蔽信道(Covert Channel)等分支。

现代隐写<sup>[1-2]</sup>主要研究在综合考虑不可感知性(Imperceptibility)、嵌入容量(Embedding Capacity)和鲁棒性(Robustness)等因素的情况下, 如何将密息嵌入作为载体的数字图像和视音频等数字多媒体文件, 使得产生的隐写文件能够有效保持原始载体文件的视听觉感官质量和统计特性, 从而在公开信道传输时, 不会引起第三方的怀疑和察觉, 以此建立隐蔽信道, 实施隐蔽通信。现代隐写技术通过掩盖通信事实以保障数据安全, 其作为传统加密技术(Cryptography)的重要补充, 可进一步增强数据的安全保障效果。现代隐写技术适用于军事、金融等涉

通讯作者: 尤玮珂, 博士研究生, Email: youweike@iie.ac.cn。

本研究得到国家自然科学基金(No.U1636102); 国家重点研发计划(No.2016YFB0801003, No.2016QY15Z2500, No.2017YFC0822704), 北京市科委项目(No.Z181100002718001); 中国科学院信息工程研究所基础前沿项目(No.Y7Z0371102)资助。

收稿日期: 2018-06-20; 修改日期: 2018-09-14; 定稿日期: 2018-09-28

及敏感数据传输交互的领域, 具有广阔的应用前景。按照载体所属的数字多媒体文件类型, 现代隐写可分为图像隐写、视频隐写和音频隐写这三类。

随着隐写技术的快速发展, 互联网上出现了多种可公开下载的隐写软件, 使用者无需具备相关专业知识便可采用其实施隐蔽通信。由此可见, 隐写技术作为一种保障数据安全的有效手段, 存在着被滥用的风险。事实上, 根据近年来的相关新闻报道<sup>[3-7]</sup>, 隐写技术已愈加频繁地被犯罪集团、恐怖组织和间谍机构利用, 对国家安全构成了严重威胁。因此, 对隐写通信进行有效监管以遏制隐写技术的恶意或非法使用, 成为了多数国家和相关机构的迫切需求。

隐写分析(Steganalysis)是一种检测载体对象是否存在隐写操作痕迹的技术。作为对抗隐写的重要手段, 隐写分析主要研究隐写算法的嵌入模式和隐写操作对载体统计特性引入的扰动, 在此基础上通过构建合理的检测框架模型, 并借助模式识别、机器学习等领域的技术知识, 以实施隐写分类判决。按照待测载体所属的数字多媒体文件类型, 隐写分析可分为图像隐写分析、视频隐写分析和音频隐写分析这三类。

近年来, 随着视频点播(Video-On-Demand)、流媒体直播(Live Streaming)等高互动多媒体应用(Highly Interactive Multimedia Application)的兴起和广泛流行, 数字视频以其丰富的视觉表现和强大的信息携带能力, 正逐步取代图像, 成为当今娱乐产业中最具影响力的传播媒介<sup>[8-9]</sup>。此外, 随着视频压缩编码<sup>[10-15]</sup>、计算机网络和高性能计算等技术的快速发展, 数字视频可在保持较高编码效率和视觉保真度的条件下, 被快速制备并于互联网上实时传播。基于上述事实, 数字视频目前被普遍视为一种理想的隐蔽通信载体, 视频隐写和视频隐写分析技术也因此吸引了信息隐藏领域研究者的广泛关注, 成为该领域的研究热点之一。

按照隐写嵌入域的不同, 视频隐写可分为空域(Spatial Domain)视频隐写和压缩域(Compressed Domain)视频隐写两大类。绝大多数空域视频隐写算法借鉴了诸如最低有效比特位匹配<sup>[16-17]</sup>、量化索引调制<sup>[18-19]</sup>和扩频<sup>[20-22]</sup>等图像隐写领域的经典算法, 在视频压缩编码前直接修改视频帧的原始像素值以嵌入密息, 并采用纠错码技术和重复嵌入的方式, 增强密息抗压缩编码的鲁棒性从而降低误码率; 另一类空域视频隐写算法被集成在互联网上可公开下载的某些非开源视频隐写软件中(如 MSU Stego-Video<sup>[23]</sup>), 相应研发团队尚未公布有关算法的原理

和技术细节。压缩域视频隐写将隐写嵌入操作和视频压缩编码紧密耦合, 通过对视频压缩编码框架中的关键模块进行扰动, 并调制修改其产生的码流语法元素(Syntax Element)以嵌入密息。近年来, 视频编码技术<sup>[10-15]</sup>的更新换代, 有效促进了压缩域视频隐写技术的发展。按照隐写嵌入域, 压缩域视频隐写可进一步细分为: 基于帧内预测模式(Intra Prediction Mode)的隐写<sup>[24-29]</sup>, 基于帧间预测模式(Inter Prediction Mode)的隐写<sup>[30-32]</sup>, 基于运动向量(Motion Vector, MV)的隐写<sup>[33-44]</sup>, 基于量化参数(Quantization Parameter)的隐写<sup>[45-47]</sup>, 基于变换系数(Transform Coefficient)的隐写<sup>[48-51]</sup>, 基于熵编码(Entropy Coding)的隐写<sup>[52-53]</sup>等。

相比日益成熟的图像隐写分析技术<sup>[54-61]</sup>, 针对视频隐写分析技术的研究起步较晚, 其发展现状可概括为以下三个方面。首先, 现有视频隐写分析技术的体系不够健全。当前研究主要集中在针对空域视频隐写、基于运动向量的视频隐写、基于帧内预测模式的视频隐写的分析方法上。针对某些特定类型的视频隐写, 目前尚不存在有效的分析检测方法。其次, 现有视频隐写分析方法的检测范围有限。目前仅存在针对单一隐写嵌入域的专用(Specific)视频隐写分析方法, 尚缺乏能够有效检测多个隐写嵌入域的通用(Universal)分析方法, 导致现有视频隐写分析技术的适用范围在一定程度上受到了制约。此外, 现有视频隐写分析方法的鲁棒性较低。绝大多数分析方法易受载体源失配(Cover Source Mismatch)<sup>[62-63]</sup>的影响, 主要表现在, 当待测视频的码率、帧率、尺寸等编码参数或属性与训练视频样本存在明显差异时, 分析方法的检测性能易产生波动, 从而难以在先验知识匮乏的实际应用场景下, 提供稳定、可靠的隐写分类判决结果。

视频隐写技术的快速发展, 使得视频隐写分析面临着巨大的挑战。据我们所知, 目前尚不存在公开发表的文献, 对有关视频隐写分析技术的研究做出综述概括。因此, 为了推动视频隐写分析技术的进步, 有必要对近年来视频隐写分析领域的最新研究进展进行归纳和梳理, 并对未来可能的研究方向进行展望和讨论, 以供研究者参考。由于压缩域视频隐写技术长期以来是视频隐写领域的研究重点, 因此, 本文将着重回顾和论述有关压缩域视频隐写分析技术的研究工作。

本文结构安排如下: 第 2 部分将介绍压缩域视频隐写技术的发展现状; 第 3 部分将按照隐写嵌入域的类型, 针对基于运动向量、帧内预测模式、变换

系数、帧间预测模式、量化参数和熵编码的视频隐写, 分别阐述相应专用隐写分析技术的原理, 并对其中的经典方法进行详细介绍和分析; 第 4 部分将

基于当前视频隐写分析技术的发展现状, 对其未来可能的研究重点和发展方向进行讨论和展望; 第 5 部分对全文进行总结。

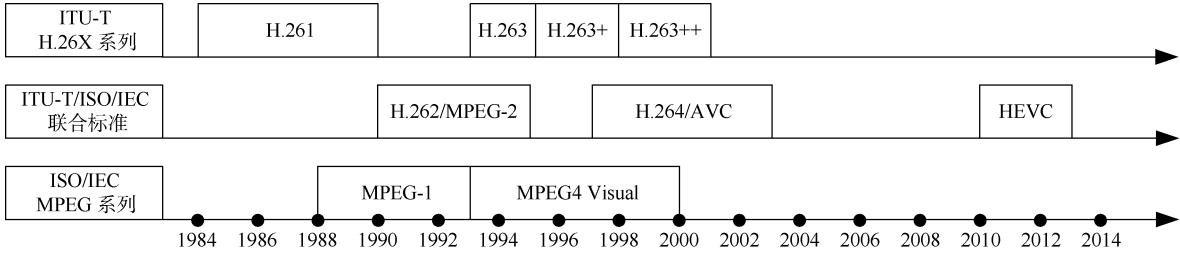


图 1 视频压缩编码标准制定历程

Figure 1 the progress of video coding standards development

2 压缩域视频隐写技术发展现状

压缩域视频隐写将隐写嵌入操作和视频压缩编码紧密耦合, 通过对视频压缩编码框架中关键模块产生的码流语法元素进行调制修改以嵌入密息。压缩域视频隐写算法的实现较为复杂, 需要深入理解所采用的视频编解码框架的处理流程、技术原理和底层细节。相比空域视频隐写, 压缩域视频隐写一般具有更高的隐写嵌入容量, 此外, 在非转码或非重压缩条件下, 解码端通常能够快速、无损地提取压缩域视频隐写算法嵌入的密息。因此, 压缩域视频隐写长期以来吸引着相关研究者的广泛关注, 是视频隐写领域的研究重点。

压缩域视频隐写的发展通常得益于视频压缩编码技术的更新换代(图 1)。早期针对 MPEG-1, MPEG-2<sup>[11]</sup>或 MPEG-4 Visual<sup>[13]</sup>设计的压缩域视频隐写算法, 通常只能将 DCT(Discrete Cosine Transform)系数和运动向量作为隐写嵌入域。H.264/AVC<sup>[14,64]</sup>的推出, 引入了多种可用于实施隐写的新编码特性(如帧内预测编码、帧间预测多模式运动估计)(图 2), 不仅丰富了隐写嵌入域的种类, 还有效促进了压缩域视频隐写领域的研究进展。

按照隐写嵌入域, 压缩域视频隐写主要包括: 基于运动向量的隐写, 基于帧内预测模式的隐写, 基于帧间预测模式的隐写, 基于变换系数的隐写, 基于量化参数的隐写和基于熵编码的隐写。以下将依次阐述上述各类型压缩域视频隐写的发展现状, 并对其中具有代表性的经典算法进行简要介绍。

2.1 基于运动向量的视频隐写

基于运动向量的视频隐写将视频压缩编码框架中运动估计模块生成的运动向量(图 3)作为密息载体。按照运动向量域视频隐写的发展历程, 其可分为

三类: 传统运动向量域视频隐写、基于隐写码(Steganographic Codes)的运动向量域视频隐写、基于局部最优(Local Optimality)保持的运动向量域视频隐写。

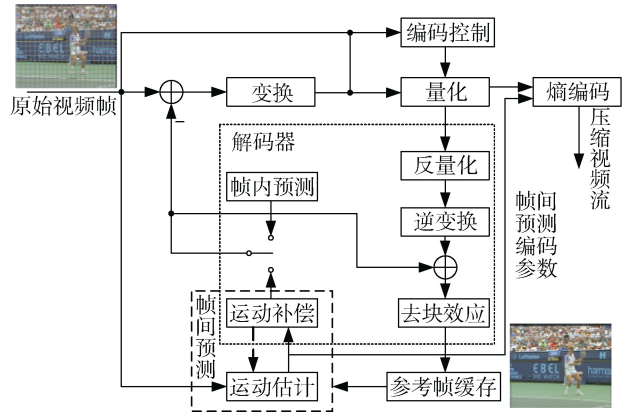


图 2 H.264/AVC 编码框架示意图

Figure 2 H.264/AVC encoder block diagram

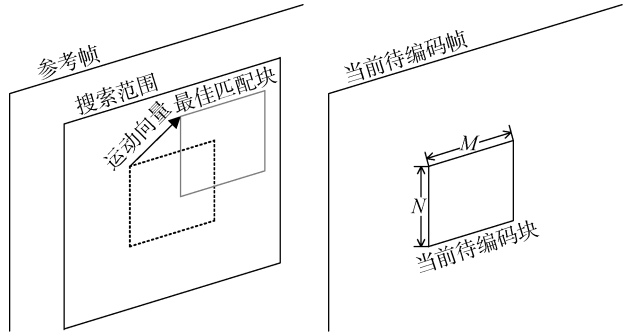


图 3 运动估计

Figure 3 block-based motion estimation

传统运动向量域视频隐写通常采用简单的筛选规则选择部分运动向量用于嵌入修改。Kutter 等<sup>[33]</sup>首先提出将非零运动向量水平及垂直分量的最低有效比特位替换成密息比特以实施隐写。Xu 等<sup>[34]</sup>认为

选择幅值较大的运动向量进行修改能有效降低隐写造成的视觉质量和压缩编码性能等方面的扰动, 并建议根据运动向量的相位角选择其水平或垂直分量进行调制修改。Fang 等<sup>[35]</sup>选取幅值大于预设阈值的运动向量并计算它们之间的相位角差异, 通过调整修改运动向量的相位角以嵌入密息。Aly 等<sup>[36]</sup>通过实验发现, 运动向量的幅值不适合作为载体筛选的标准, 而应该选取预测误差大于预设阈值的宏块所对应的运动向量进行隐写嵌入。

另一类运动向量域视频隐写采用隐写码降低运动向量的修改数量, 以此提高嵌入效率(平均意义上每次嵌入修改操作所能隐写的密息比特数)和隐写安全性(统计不可区分性)。Hao 等<sup>[38]</sup>采用了矩阵编码<sup>[65-66]</sup>, 使得对于当前帧中的  $2^k - 1$  个运动向量, 最多只需修改其中 1 个即可嵌入  $k$  比特密息。Cao 等<sup>[39]</sup>提出的算法基于湿纸编码 WPC(Wet Paper Codes)<sup>[67]</sup>构建隐蔽信道, 以宏块和其相应预测块之间的相似程度作为干湿点的判定标准, 在嵌入过程中将需要修改的运动向量替换成其相应的次优运动向量。在文献[40]中, Cao 等应用了 ZZW<sup>[68]</sup>隐写嵌入框架构建了双层隐蔽信道, 进一步提高了嵌入效率和嵌入容量。Yao 等<sup>[41]</sup>对运动向量的时空相关性(Spatial and Temporal Correlation)进行了研究, 综合考虑了隐写嵌入引起的运动向量统计分布特性的变化和帧间编码的预测残差变化, 在此基础上设计了运动向量扰动代价函数, 并与校验网格码 STC(Syndrome Trellis Codes)<sup>[69-70]</sup>相结合以最小化总体嵌入扰动。这类运动向量域视频隐写算法相比传统基于运动向量的隐写算法, 具有更高的隐写安全性。

基于局部最优保持的运动向量域视频隐写尝试在隐写嵌入过程中保持被修改运动向量的局部最优。Zhang 等<sup>[43]</sup>提出了名为 MVMPLO(MV Modification with Preserved Local Optimality)的运动向量调制方式, 使得任意被修改的运动向量, 均能满足基于 SAD(Sum of Absolute Differences)的运动向量局部最优判定准则, 进而通过合理设计的代价函数并结合 STC, 以最小化总体嵌入扰动。在 Cao 等<sup>[44]</sup>的工作中, 他们探寻了满足基于 SAD 的运动向量局部最优判定准则的可能性, 并设计了合理的代价函数, 使得在隐写嵌入过程中, 尽可能修改受到扰动后仍能以较大概率被该准则判定为局部最优的运动向量, 从而有效提高了隐写安全性。这类运动向量域视频隐写算法相比同类算法, 达到了当前最高的隐写安全性。

## 2.2 基于帧内预测模式的视频隐写

基于帧内预测模式的视频隐写将压缩视频中帧内编码(Intra-coded)单元采用的帧内预测模式作为密息载体。

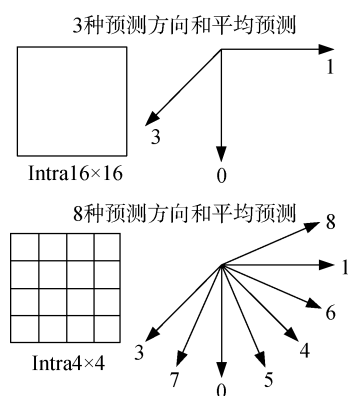


图 4 H.264/AVC 帧内预测模式

Figure 4 intra prediction modes in H.264/AVC

Hu 等<sup>[24,25]</sup>首先提出基于 H.264/AVC 帧内预测模式(图 4)的隐写算法。该算法在隐写时根据密钥随机选择嵌入位置模版, 进而在模版控制下确定当前帧内预测编码宏块中的宿主  $4 \times 4$  亮度块的位置。对于当前待修改的 Intra4x4 帧内预测模式, 根据预设的“密息比特—帧内预测模式”映射规则, 将其替换成待嵌密息比特对应分组中的最优 Intra4x4 帧内预测模式。在 Yang 等<sup>[26]</sup>提出的基于 H.264 帧内预测模式的隐写算法中, 他们在 9 种 Intra4x4 帧内预测模式和密息比特之间建立了映射关系, 并在嵌入过程中通过矩阵编码<sup>[65-66]</sup>减少需要修改的预测模式的数量, 使得每嵌入 2 比特密息最多只需修改 1 个 Intra4x4 预测模式。此外, 还采用嵌入位置模版进一步增强隐写安全性。在文献[27]中, Wang 等提出了一种基于 HEVC 帧内预测模式的隐写算法, 对于 I 帧内某个  $8 \times 8$  的编码单元, 若其被等分成 4 块分别进行帧内预测编码, 则根据预设的“密息比特—帧内预测模式”映射表, 通过修改其中若干个  $4 \times 4$  块的帧内预测模式以嵌入 3 比特密息。Bouchama 等<sup>[28]</sup>为了达到较高嵌入容量和编解码速率, 根据预测方向将 H.264 的 Intra4x4 帧内预测模式划分成 4 组, 使得同一分组的预测模式具有相近的预测方向。隐写嵌入时, 对于当前待修改的预测模式, 在其对应分组内根据待嵌密息比特选择最佳帧内预测模式作为修改结果。Xu 等<sup>[29]</sup>提出的算法采用混沌序列(Chaotic Sequence)筛选 Intra4x4 预测模式用于密息嵌入, 对于当前待修改的预测模式, 从和它索引编号奇偶性不同的候选 Intra4x4 模式中, 选择具有最小拉格朗日代价

(Lagrangian Cost)的模式作为最佳修改结果。

## 2.3 基于帧间预测模式的视频隐写

基于帧间预测模式的视频隐写将压缩视频中帧间编码(Inter-coded)单元采用的帧间预测模式作为密息载体。

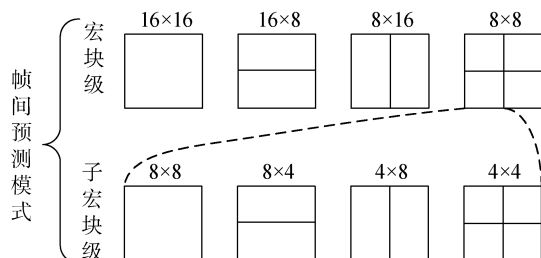


图5 H.264/AVC 帧间预测模式

Figure 5 inter prediction modes in H.264/AVC

Kapotas 等<sup>[30]</sup>在 H.264/AVC 宏块级帧间预测模式(图 5)和密息比特间建立了映射关系, 隐写时根据待嵌密息比特调制修改当前帧间编码单元的宏块级帧间预测模式。类似地, Yang 等<sup>[31]</sup>构建了“密息比特—子宏块级帧间预测模式”映射关系, 通过调制修改子宏块级帧间预测模式以嵌入密息。Zhang 等<sup>[32]</sup>提出的算法利用了 H.264 中树状结构帧间预测模式划分的编码特性, 基于 ZZW<sup>[68]</sup>隐写嵌入框架, 采用 STC<sup>[69-70]</sup>和 WPC<sup>[67]</sup>构建了双层隐蔽信道, 有效提高了嵌入效率和嵌入容量, 并保证了隐写安全性。

## 2.4 基于变换系数的视频隐写

基于变换系数的视频隐写通过修改视频压缩编码框架中变换编码模块生成的变换系数(如 DCT 系数)以实施隐写, 一般具有较大的嵌入容量。

Ma 等<sup>[48]</sup>提出, 对于 H.264/AVC 视频中采用 Intra4x4 模式进行帧内编码的 4x4 亮度块, 可根据其邻块的帧内预测模式, 从当前块中选择由两个量化 DCT 系数组成的配对系数进行修改以嵌入密息。修改配对系数时, 根据待嵌密息比特调制第一个系数的奇偶性, 同时对第二个系数进行对称修改, 从而将失真限制在重建残差块的中间两行或两列, 以此有效消除隐写造成的失真漂移(Distortion Drift)现象。Lin 等<sup>[49]</sup>在 Ma 等<sup>[48]</sup>工作的基础上进行了改进, 引入了新的 DCT 系数修改模式, 进一步提高了嵌入容量。Chang 等<sup>[50]</sup>将该类算法移植到了 H.265/HEVC 压缩视频上, 并认为在低码率条件下, 所提算法相比文献[48]和文献[49]中算法拥有更大的隐写嵌入容量。Neufeld 等<sup>[51]</sup>将图像隐写领域的最低有效比特位替换<sup>[71]</sup>、最低有效比特位匹配<sup>[16-17]</sup>和 F5 隐写算法<sup>[72]</sup>进行移植以实施基于视频量化 DCT 系数的隐写, 并

针对亮度、色度分量、不同宏块类型以及是否修改直流系数等问题, 分别通过实验衡量相应的隐写安全性。实验中对压缩视频亮度和色度分量上的量化 DCT 系数提取一阶直方图特征和二阶共生(co-occurrence)矩阵特征, 并采用最大平均差异(Maximum Mean Discrepancy, MMD)<sup>[73]</sup>和 KL 离散度(Kullback-Leibler Divergence, KLD)<sup>[74]</sup>衡量载体与隐写样本之间的可区分性。实验结果表明, 当视频质量较高时, 采用 F5 算法对 P 类型宏块的所有非零量化 DCT 系数进行嵌入修改, 并将负载适当偏向色度分量时, 能够获得相对较高的隐写安全性。

## 2.5 基于量化参数的视频隐写

基于量化参数的视频隐写通过调制修改编码单元的量化参数以嵌入密息。

Wong 等<sup>[45]</sup>提出的算法采用了矩阵编码<sup>[65-66]</sup>降低量化参数的修改数量, 并设计了一种能在隐写过程中尽可能保持量化参数一阶直方图统计特性的调制方式。Wong 等的另一研究成果<sup>[46]</sup>涉及针对 MPEG-1/2/4 压缩视频的隐写, 所提算法直接对压缩视频码流中的量化参数和量化 DCT 系数进行同步修改, 并且能够完全保持隐写视频的视觉质量。此外, 该算法具有可逆性, 能够从隐写视频中移除嵌入的密息, 并正确恢复出原始载体视频。在文献[47]中, Shanableh 等针对 MPEG-2 定码率压缩视频, 通过加减一的方式调制量化参数以实施隐写, 并建立了二阶多元回归模型用于密息提取。

## 2.6 基于熵编码的视频隐写

基于熵编码的视频隐写将视频压缩编码框架中熵编码模块生成的码字作为密息载体。

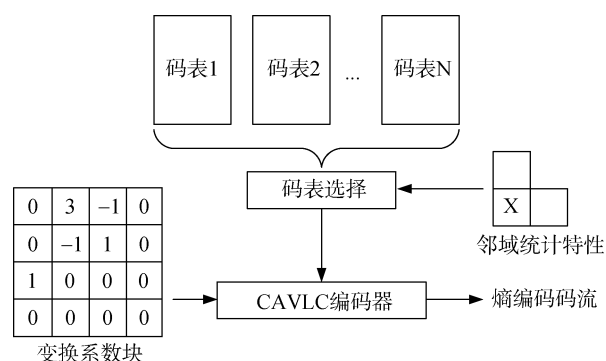


图6 CAVLC 编码模块框架

Figure 6 CAVLC encoder overview

在文献[52]中, Liao 等提出了基于 H.264/AVC 中 CAVLC(Context-Adaptive Variable Length Coding)(图 6)的隐写算法, 通过调制 CAVLC 码字 T1(用于标识变换系数块中拖尾 $\pm 1$ 系数的数量)以嵌入密息。作者



声称可有效保持载体视频的视觉保真度和压缩编码性能, 并具有较低的计算复杂度。Kim 等<sup>[53]</sup>认为, 修改 T1 会影响相邻变换系数块熵编码时的码表选择, 使得视频码率产生波动, 因此建议修改拖尾  $\pm 1$  系数的符号以实施隐写。

### 3 压缩域视频隐写分析技术

压缩域视频隐写分析用于检测视频在压缩编码过程中生成的码流语法元素是否被用作密息载体。

相比发展成熟的空域视频隐写分析, 压缩域视频隐写分析尚处于较为初级的发展阶段。当前只存在针对单一隐写嵌入域的专用分析方法, 尚缺乏能够有效检测多个隐写嵌入域的通用分析方法。

以下将按照隐写嵌入域的类型(运动向量、帧内预测模式、变换系数、帧间预测模式、量化参数、熵编码), 分别对相应专用隐写分析技术的研究进展进行归纳和梳理, 并对其中具有代表性的经典方法进行详细介绍和分析。

#### 3.1 运动向量域视频隐写分析技术

该类隐写分析技术用于检测运动向量域视频隐写, 相关研究已较为成熟, 研究成果较多。根据采用的主要技术路线, 现有运动向量域视频隐写分析方法通常可分为四类: 基于运动向量统计特性检测的分析方法, 基于运动向量校准的分析方法, 基于运动向量局部最优判定的分析方法, 基于自适应策略的分析方法。

##### 3.1.1 基于运动向量统计特性检测的分析方法

该类分析方法的基本思想是, 运动向量域视频隐写将对运动向量的统计特性造成扰动, 通过探寻并构建对隐写操作敏感的运动向量统计特性模型, 将有助于相应隐写分析方法的设计。

Su 和 Zhang 等<sup>[75-76]</sup>将基于运动向量的隐写嵌入建模为对运动向量的水平和垂直分量分别施加零均值加性独立噪声信号, 并认为嵌入操作会破坏运动向量的时空相关性。通过理论分析, 他们提出了基于混叠效应(Aliasing Effects)和 COM(Center Of Mass)的 12 维隐写分析特征。然而, 文中并未说明当帧间预测分块的尺寸可变时应如何提取特征, 故该方法不适用于 H.264/AVC<sup>[14]</sup>和 H.265/HEVC<sup>[15]</sup>视频。

Deng 等<sup>[77]</sup>提出, 对时空域相邻运动向量的水平和垂直分量分别执行二阶差分操作, 能更加有效地反映隐写嵌入对运动向量时空相关性造成的扰动。他们通过理论分析, 并综合考虑 COM, 以及分量二

阶差分概率质量函数(Probability Mass Function, PMF)的统计期望和方差, 设计了 12 维隐写分析特征。然而, 作者并未说明当帧间预测分块的尺寸可变时, 如何进行特征提取, 故该方法无法检测 H.264 和 HEVC 视频。

王丽娜等<sup>[78]</sup>认为, 隐写嵌入会不同程度地破坏运动向量水平和垂直分量的邻域相关性, 提出了基于运动向量相关性异常检测的分析方法。具体地, 为解决 H.264 中复杂宏块类型和可变帧间预测分块尺寸对运动向量域隐写分析造成的影响, 设计了适用于可变尺寸分块的四向扫描方法, 并通过衡量不同方向扫描链上相邻运动向量分量的差异, 以提升分析特征对隐写操作的敏感度, 进而基于归一化运动向量共生矩阵, 构建得到 392 维分析特征, 达到了良好的分析性能和检测速率。

在 Tasdemir 等<sup>[79]</sup>的工作中, 他们通过实验证明了运动向量存在时空相关性, 并借鉴图像隐写分析领域空域富模型特征 SRM(Spatial Rich Model)<sup>[54]</sup>的设计思想, 从不同方向对基于连续视频帧构建的运动向量平面块(Motion Vector Plane Block)进行切割, 并执行高通滤波(High-Pass Filter)(文献[79]中采用了 28 种滤波核)、量化、截断、计算共生矩阵、融合降维等操作(图 7), 最终设计出名为 STRM (Spatio-Temporal Rich Model)的 44785 维分析特征。然而, 当帧间预测分块的尺寸可变时, 文中并未说明应如何构建运动向量平面块, 故 STRM 不适用于 H.264 和 HEVC 视频。

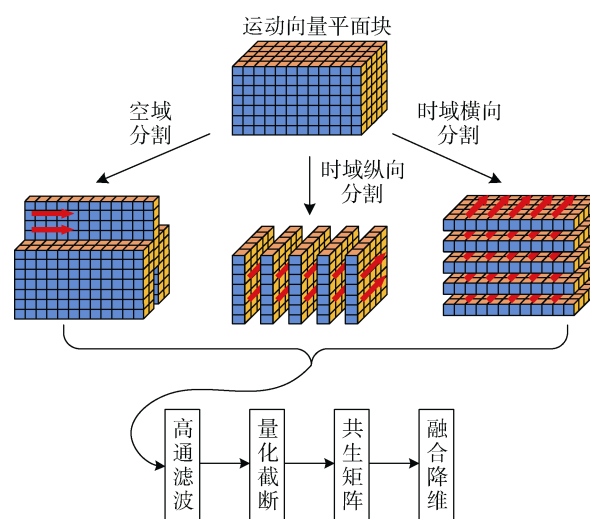


图 7 STRM 特征提取流程图

Figure 7 the flow diagram of STRM feature extraction

此外, 还存在其他基于运动向量统计特性检测的专用分析方法。Wu 等<sup>[80]</sup>认为, 运动向量域视频隐

写会对运动向量差分的联合分布统计特性造成扰动。基于此假设,他们分别对时空域中具有不同相对位置(文献[80]中预设了120种)的运动向量的分量一阶差分进行统计建模,并将所得的PMF合并成9720维分析特征。Xu等<sup>[81]</sup>认为,对于不同帧间编码视频帧中内容相似的亮度块,它们对应的运动向量存在约束关系,对此约束进行合理建模,将有助于提升相应分析方法的检测性能。

### 3.1.2 基于运动向量校准的分析方法

该类分析方法借鉴了图像隐写分析领域的校准(Calibration)<sup>[82]</sup>思想,采用重压缩等方式,精确估计或恢复原始载体视频的统计特性或编码状态,在此基础上通过对待测视频校准前后统计特性的差异进行衡量,以实施隐写分类判决。

Cao等<sup>[83]</sup>通过理论分析证明了隐写过程中被修改的运动向量在视频重压缩时通常会表现出回复至其原始状态的趋势。他们根据此运动向量回复特性,对视频重压缩前后同位置运动向量的差异以及相应帧间预测残差的变化进行了衡量,在此基础上设计了名为MVRB(Motion Vector Reversion-Based)的15维隐写分析特征。实验结果表明,MVRB的隐写分析性能优于Su和Zhang等<sup>[75-76]</sup>提出的方法,能够有效检测传统运动向量域视频隐写(参见2.1部分)。然而,MVRB存在以下两点局限性。首先,在实际应用场景中,隐写分析者难以获取有关待测视频的所有编码参数或细节。事实上,文献[84]的实验结果表明,当视频重压缩的编码参数和原始视频的编码参数存在较大差异时,MVRB的检测效果将受到较大影响。其次,H.264和HEVC视频在重压缩后,帧间编码单元的类型和分块尺寸都可能发生变化,这将使得重压缩前后的运动向量在很大概率上不存在对应关系,因此,其不适用于H.264和HEVC视频。

Deng等<sup>[85]</sup>认为,隐写视频中被修改运动向量的原始状态,可通过其相邻运动向量进行估测。根据此假设,他们提出了基于局部多项式核(Local Polynomial Kernel)回归模型的运动向量恢复算法,用于对运动向量的原始状态进行校准。在此基础上,他们对待测视频中运动向量校准前后的差异(校准距离)进行统计建模,并提取3维隐写分析特征。

Ren等<sup>[86]</sup>采用了基于重建SAD的运动向量局部最优判定准则,通过计算视频重压缩前后运动向量局部最优概率的变化,提出了名为SPOM(Subtractive Probability of Optimal Matching)的1维隐写分析特征。然而,SPOM的分析性能依赖重压缩时编码参数的选择,若其与原始视频的编码参数存在较大差

异,则会对分析检测正确率产生显著影响。

Wang等<sup>[87]</sup>对MVRB<sup>[83]</sup>进行了改进,提出了名为MVRBR(MVRB Revisited)的分析方法。首先,在待测视频解码阶段,搜集可直接获取的视频属性和编码参数,如视频尺寸、帧率、量化参数;其次,在待测视频重压缩阶段,穷举不同的运动估计搜索方法,并分别将生成的运动向量和原始运动向量进行对比匹配,以此推断出原始视频编码时采用的运动估计搜索方法。MVRBR能在一定程度上克服MVRB因重压缩时编码参数和原始视频编码参数不一致而导致分析性能急剧下降这一局限性,有效增强了在非理想条件下的检测性能。

Zhai等<sup>[88]</sup>通过实验证明,相比相邻运动向量差分,运动向量预测残差(运动向量和其预测值之间的差异)更适用于构建运动向量域视频隐写分析特征。在此基础上,他们通过探寻隐写操作对运动向量预测残差和帧间编码分块对应重建SAD的统计特性造成的扰动,进行隐写分析特征设计。此外,他们提出了WOC(Window Optimal Calibration)运动向量校准方法,进一步增强了分析特征的检测性能,最终设计出124维联合校准(Combined and Calibrated)特征用于隐写分析。

### 3.1.3 基于运动向量局部最优判定的分析方法

根据视频编码的原理,任意原始运动向量均为局部最优(Locally Optimal),对其进行隐写修改将以极大概率破坏其局部最优性质,即将其从局部最优运动向量修改成非局部最优。因此,建立合理的运动向量局部最优判定准则以精确检测运动向量是否为局部最优,将有助于提高相应分析方法的检测性能。

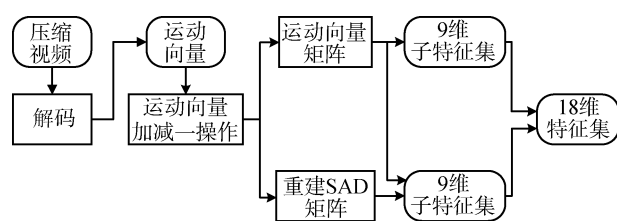


图8 AoSO特征提取流程图

Figure 8 the flow diagram of AoSO feature extraction

在Wang等<sup>[84]</sup>的工作中,他们对视频压缩量化失真进行了理论分析,发现当量化步长越大时,运动向量对应的重建SAD值失真越严重。尽管如此,他们通过实验证明,虽然码率越低(即量化步长期望值越大)时,重建SAD值的相对误差越大,但其绝对值仍然很小,因此可通过重建SAD值判断运动向量是否为局部最优。在此基础上,他们提出了基于重建

SAD 的运动向量局部最优判定准则, 并通过计算运动向量及其相邻候选运动向量对应的重建 SAD 值, 设计了名为 AoSO(Add-or-Subtract-One)的 18 维隐写分析特征(图 8)。实验结果表明, AoSO 的隐写分析性能和稳定性均优于文献[75-76,83]中所提方法, 能够在不同码率和隐写嵌入强度下有效检测传统和基于隐写码的运动向量域视频隐写算法。此外, AoSO 具有较强的适用性, 广泛适用于当前主流的视频压缩编码框架和标准。然而, AoSO 存在以下两点局限性。首先, 其只通过重建 SAD 值判定运动向量是否为局部最优, 当码率极低时, 对某些隐写算法的分析检测正确率会受到较大影响。其次, 该方法在检测运动向量的局部最优时未能考虑隐写嵌入对视频编码性能造成的影响, 故其实质上无法准确判定运动向量是否为局部最优, 从而存在被攻击的可能。

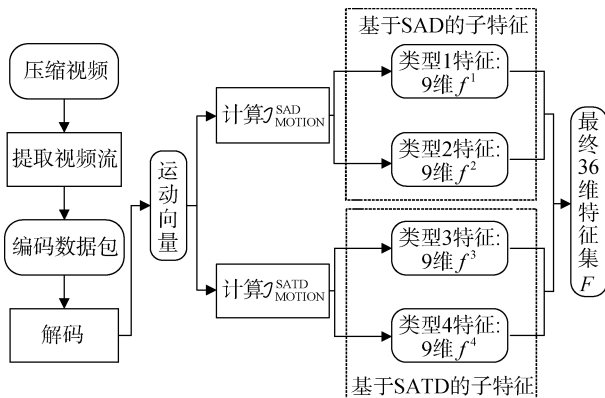


图 9 文献[89]中特征提取流程图

Figure 9 the flow diagram illustrating the feature extraction of the method proposed in [89]

Zhang 等<sup>[89]</sup>使用了更加合理的方式检测运动向量的局部最优。根据视频压缩编码中的率失真优化(Rate-Distortion Optimization)原理<sup>[90-91]</sup>, 任意运动向量在率失真意义下均为局部最优。因此, 他们建议通过综合考虑失真和编码运动向量所需的比特数以检测运动向量的局部最优。和 AoSO 不同, 所提分析方法将 SAD 和 SATD(Sum of Absolute Transformed Differences)均作为失真度量标准, 并能够恢复出原本于运动估计中生成但在有损压缩编码过程中丢失的关于运动向量编码比特数估计的信息。基于对失真和编码运动向量所需比特数的准确估计, 所提分析方法进一步通过计算拉格朗日代价以准确检测运动向量的局部最优, 最终设计出 36 维的隐写分析特征(图 9)。实验结果显示, 所提分析方法的隐写分析性能优于 AoSO<sup>[84]</sup>, 即使在低嵌入强度下, 也能够有效检测当前几乎所有类型的运动向量域隐写算法。

更重要的是, 所提分析方法能够在一定程度上缓解载体源失配对隐写分析性能造成的负面影响, 因此可在非理想检测条件下提供相对可靠的隐写分类判决结果。

### 3.1.4 基于自适应策略的分析方法

现有绝大多数运动向量域视频隐写算法通过对具有较小扰动代价(通常采用预设筛选规则或代价函数进行衡量)的运动向量进行隐写修改以嵌入密息。因此, 视频自身特性(如视频内容、运动向量分布)会对运动向量的隐写修改结果产生较大影响, 造成(帧内和帧间)密息负载分布不均等现象。因此, 可借鉴图像隐写分析领域中自适应分析方法的设计思想<sup>[58]</sup>, 通过建立合理的自适应检测策略或框架, 从而提高现有运动向量域视频隐写分析方法的检测性能。

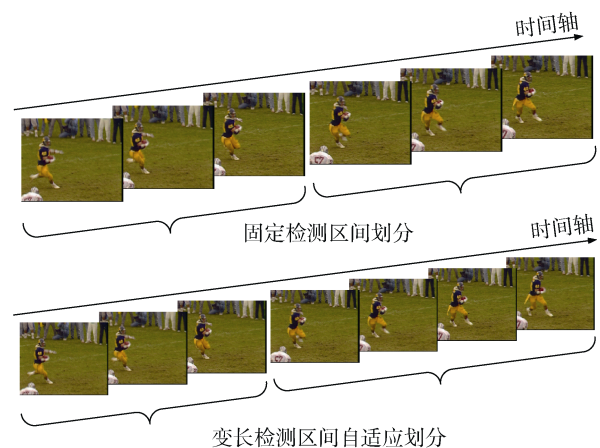


图 10 传统和自适应视频隐写分析检测区间划分策略

Figure 10 a comparison between the strategies for dividing detection units employed by conventional and adaptive video steganalysis

在 Wang 等<sup>[92]</sup>的工作中, 他们根据现有运动向量域视频隐写算法的嵌入修改原理, 以及嵌入容量和视频帧运动丰富度的关系, 对运动向量可疑度(适用于隐写修改的程度)和视频帧动态度(Frame Dynamic Degree)进行了合理量化。在此基础上, 他们对传统视频隐写分析的检测框架和特征提取模式进行了改进, 提出了基于变长检测区间(图 10)的自适应视频隐写分析策略。具体地, 该策略通过计算待测视频的帧动态度, 自适应地将其划分成变长检测区间, 并筛选可疑度较大的运动向量用于特征提取, 从而有效提高了运动向量域隐写分析特征的检测性能。

在 Wang 等<sup>[93]</sup>的另一工作中, 他们研究了视频内容运动信息对运动向量域隐写分析特征有效性的影



响, 提出了基于视频内容分类的自适应视频隐写分析策略(图 11)。具体地, 采用该策略进行隐写分析时, 为了降低视频内容变化对运动向量统计特性的扰动, 基于视频帧的运动丰富度, 将视频分割为若干子序列, 并根据运动强度对所得子序列进行分类。训练阶段, 对于不同类型的子序列, 分别进行特征提取和分类器训练。检测阶段, 对待测视频的各子序列, 根据其类别, 优选合适的分类器进行分析, 并将各分类器的分析结果进行加权融合, 最终得到针对待测视频的隐写分类判决结果。实验数据显示, 该策略可在一定程度上提高运动向量域隐写分析的检测效果。

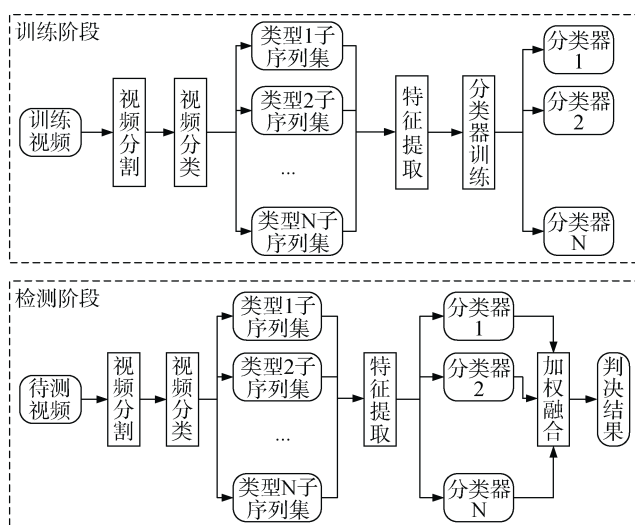


图 11 文献[93]中自适应视频隐写分析策略流程图

Figure 11 the flow diagram of the adaptive video steganalysis strategy proposed in [93]

### 3.2 针对基于帧内预测模式视频隐写的分析技术

该类隐写分析技术用于检测基于帧内预测模式的视频隐写, 有关研究成果较少, 且只适用于 H.264/AVC 视频。

Li 等<sup>[94]</sup>认为, H.264 视频的 Intra4×4 帧内预测模式存在空间相关性, 对其进行合理建模以有效衡量隐写操作对 Intra4×4 模式相关性造成的扰动, 将有助于提升相应分析方法的检测性能。基于此, 他们对待测视频中每个包含 Intra4×4 模式的帧内编码宏块, 从四个方向(水平、垂直、对角和反对角)对其中的 Intra4×4 模式进行扫描, 通过计算不同方向扫描链上 Intra4×4 模式的状态转移概率, 设计了名为 PMC(Prediction Mode Correlation)的 9801 维分析特征。实验结果表明, PMC 可检测多种基于 Intra4×4 模式的隐写算法<sup>[24-26,29]</sup>, 且当嵌入强度较大时, 具有理

想的分析效果。

Zhao 等<sup>[95]</sup>发现, 隐写过程中被修改的 Intra4×4 模式在视频重压缩后通常会回复至其原始最优值, 而未经修改的帧内预测模式在视频重压缩后一般保持不变。在此基础上, 他们采用校准思想, 对待测视频中每个可用于隐写的 4×4 帧内预测块, 记录其在重压缩时分别采用不同 Intra4×4 帧内预测模式进行编码对应的 SATD 代价, 进而根据 Intra4×4 模式重压缩前后的状态转移概率和相应 SATD 代价的变化程度, 设计了名为 IPMC(Intra Prediction Mode Calibration)的 13 维隐写分析特征。实验结果表明, IPMC 的隐写分析性能优于 PMC<sup>[94]</sup>, 能够有效检测现有基于 H.264 帧内预测模式的视频隐写算法。

### 3.3 针对基于变换系数视频隐写的分析技术

该类隐写分析技术用于检测基于变换系数的视频隐写, 相关研究成果较少, 且只适用于 H.264 视频。

Wang 等<sup>[96]</sup>借鉴了图像隐写分析领域 DCTR<sup>[61]</sup>特征的设计思想, 通过分析基于 H.264 量化 DCT 系数的视频隐写对视频时空相关性造成的扰动, 构建了两类隐写分析特征集(图 12)。首先, 根据量化 DCT 系数隐写修改将对重建视频空域像素的统计特性造成扰动这一事实, 使用基于 DCT 核的卷积操作, 并计算视频帧经过卷积后的空域直方图, 作为帧内特征; 其次, 通过运动向量连接相邻视频帧的相似块以构造时域分片, 结合隐写修改对帧内编码分块造成的嵌入失真, 使用基于 DCT 核的卷积操作, 计算视频帧的时域直方图, 作为帧间特征。将所得的帧内和帧间特征进行融合降维, 最终得到 1440 维隐写分析特征集。实验结果表明, 该方法针对基于 H.264 量化 DCT 系数的视频隐写, 达到了当前最佳的检测效果。

### 3.4 针对基于帧间预测模式视频隐写的分析技术

该类隐写分析技术用于检测基于帧间预测模式的视频隐写, 相关研究成果较少。

文献[97]提出了一种基于帧间预测模式回复特性检测的 H.264 视频隐写分析方法。其基本原理为: 隐写过程中被修改的帧间预测模式, 在视频重压缩时通常会表现出回复至其原始状态的趋势, 对此回复特性进行有效检测, 将有助于提升相应分析方法的检测性能。在此基础上, 通过构建 H.264 宏块级和子宏块级帧间预测模式(图 5)在视频重压缩前后的状态转移概率矩阵(State Transition Matrix, STM), 设计了 40 维隐写分析特征(图 13)。

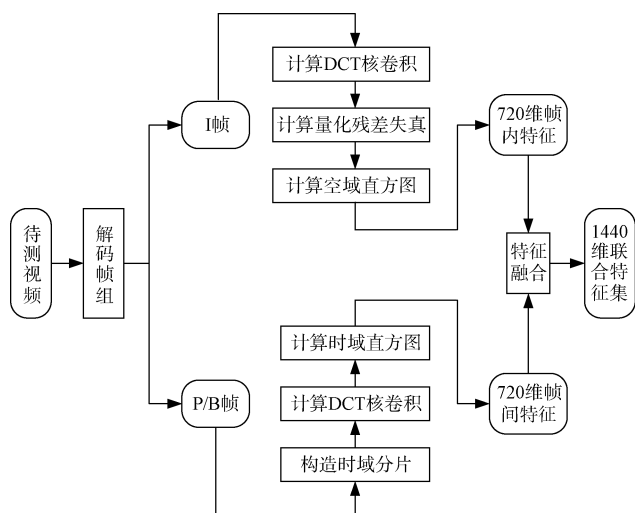


图 12 文献[96]中特征提取流程图

Figure 12 the flow diagram illustrating the feature extraction of the approach proposed in [96]

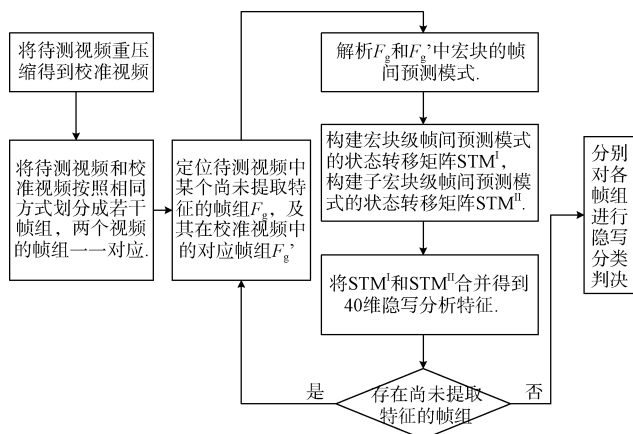


图 13 结合文献[97]所提特征的视频隐写分析流程图

Figure 13 the flow diagram of video steganalysis using the feature set proposed in [97]

### 3.5 针对基于量化参数视频隐写的分析技术

该类隐写分析技术用于检测基于量化参数的视频隐写, 相关研究成果较少。

文献[98]提出了一种基于量化参数奇异值检测的 H.264 视频隐写分析方法。其基本原理为: H.264 视频中宏块的量化参数存在空间相关性, 光栅扫描顺序下相邻宏块的量化参数有较大概率相同, 对量化参数进行隐写修改, 会对其空间相关性造成扰动。因此, 对量化参数空间相关性进行有效衡量, 将有助于构建相应的分析方法。在此基础上, 通过建立光栅扫描顺序下等值量化参数序列(图 14)的一阶统计直方图, 设计了 10 维隐写分析特征。

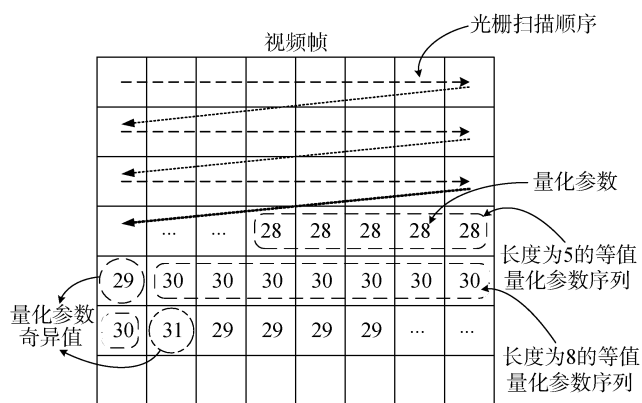


图 14 光栅扫描顺序下等值量化参数序列示例

Figure 14 an example of sequences composed of QPs with equal values in raster-scan order

### 3.6 针对基于熵编码视频隐写的分析技术

该类隐写分析技术用于检测基于熵编码的视频隐写, 相关研究成果较少。

You 等<sup>[99]</sup>对当前基于 H.264 中 CAVLC 的视频隐写算法进行了归纳和分析。他们认为, 尽管这类算法通常具有较大的嵌入容量和较低的计算复杂度, 但存在以下三点局限性。首先, 对 CAVLC 中标识非零系数数量的码字(Total\_Coeffs, T1)进行修改, 可能导致在对邻块进行熵解码时, 无法选择正确的查找表(Look-up Table)对码字 coeff\_token 进行解析, 从而使得隐写视频发生解码错误。其次, 基于 CAVLC 码字替换的隐写嵌入, 将对量化 DCT 系数造成不可控的扰动, 容易导致失真漂移(图 15), 从而对隐写视频的视听感官质量产生较大影响。此外, 对拖尾±1系数的符号进行调制修改, 将对其直方图等统计特性造成明显扰动, 从而大幅制约了隐写安全容量。



图 15 正常视频帧(上)和失真漂移视频帧(下)对比

Figure 15 a comparison between the normal frames (top) and the frames suffering from distortion drift (bottom)

## 4 未来研究方向展望

由以上对压缩域视频隐写分析技术的综述可知,目前尚不存在可检测多个嵌入域的通用视频隐写分析方法。然而,任何压缩域视频隐写算法,均会不可避免地破坏视频压缩编码的最优性,在一定程度上降低视频的压缩编码效率。基于此假设,若能构建一种针对视频压缩编码效率的度量体系或机制,则可减轻甚至克服嵌入域对视频隐写分析的约束,设计出可检测多个嵌入域的通用视频隐写分析方法。

根据上述分析,我们认为,未来可从以下三个方面,进一步推动有关视频隐写分析技术的研究。

1) 视频压缩编码效率量化模型的建立。针对不同类型的码流语法元素和视频帧,探寻如何建立合理有效的、对隐写修改敏感的视频压缩编码效率量化模型,使得能够在不同粒度层面,对视频压缩编码性能进行衡量,从而为专用和通用高性能视频隐写分析方法的设计打下基础。

2) 视频压缩编码效率最优性判定准则的构建。针对不同类型的码流语法元素和视频帧,探寻如何基于相应的视频压缩编码效率量化模型,设计合理的视频压缩编码效率最优性判定准则,使得对于压缩视频流中的待测对象,能够精确检测其当前状态在压缩编码意义下是否为全局或局部最优,从而为相应视频隐写分析方法的检测性能提供可靠保障。

3) 高性能视频隐写分析方法的设计。根据目标嵌入域中码流语法元素的编码特性和相应隐写操作的特点,探寻如何利用对应的视频压缩编码效率量化模型和视频压缩编码效率最优性判定准则,同时优选隐写分析领域其他常用的特征设计思想或机制,在此基础上进行现有特征的优化改进和新型特征的设计,以此得到具有较高检测性能和鲁棒性的实用型专用及通用视频隐写分析特征。

4) 基于深度学习的视频隐写分析技术的发展。借鉴深度学习技术成功应用于图像和音频隐写分析领域的已有成果或思想,探索其在视频隐写分析领域的应用前景,通过神经网络挖掘载体视频和隐写视频间的差异,以消除传统视频隐写分析对人工设计特征的依赖,并进一步提升分析检测性能。

## 5 总结

视频隐写分析虽起步较晚,但近年来发展迅速,成果不断。本文对当前视频隐写分析领域的研究现状进行了综述概括,重点阐述了关于压缩域视频隐写分析技术的研究进展。针对不同类型的隐写嵌入

域,分别归纳了相应专用隐写分析技术的原理,并对其中的经典方法进行了详细介绍和分析。

基于对当前压缩域视频隐写分析技术的梳理和总结,本文进一步讨论并展望了视频隐写分析领域未来可能的研究重点和发展方向,以供相关研究者参考。

我们的下一步工作分为两个方面:首先,通过借鉴当前 H.264 视频隐写分析领域较为成熟的特征设计思想,开展有关 HEVC 视频隐写分析的研究;其次,从视频压缩编码最优性检测出发,尝试构建通用视频隐写分析检测框架。

**致谢** 衷心感谢各位评审专家对本文提出的宝贵意见。本研究得到国家自然科学基金(No.U1636102),国家重点研发计划(No.2016YFB0801003, No.2016QY15Z2500, No.2017YFC0822704),北京市科委项目(No.Z181100002718001),中国科学院信息工程研究所基础前沿项目(No.Y7Z0371102)资助。

## 参考文献

- [1] I. Cox, M. Miller, J. Bloom, J. Fridrich, and T. Kalker, "Digital watermarking and steganography," San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann, 2007.
- [2] J. Fridrich, "Steganography in digital media: principles, algorithms, and applications," Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2009.
- [3] "Terror groups hide behind web encryption," J. Kelly, <http://www.usatoday.com/tech/news/2001-02-05-binladen.htm>, 2001.
- [4] "Terrorists and steganography," B. Schneier, <http://www.zdnet.com/article/terrorists-and-steganography>, 2001.
- [5] "Russian spies' use of steganography is just the beginning," C. Mims, <http://www.technologyreview.com/view/419833/russian-spies-use-of-steganography-is-just-the-beginning/>, 2010.
- [6] "Documents reveal Al Qaeda's plans for seizing cruise ships, carnage in Europe," N. Robertson, P. Cruickshank, and T. Lister, <http://edition.cnn.com/2012/04/30/world/al-qaeda-documents-future/index.html>, 2012.
- [7] "Hackers Exfiltrating Data with Video Steganography via Cloud Video Services," The State of Security, <https://www.tripwire.com/state-of-security/incident-detection/hackers-exfiltrating-data-with-video-steganography-via-cloud-video-services/>, 2014.
- [8] "YouTube in numbers," YouTube, <https://www.youtube.com/intl/en-GB/yt/about/press/>, 2018.
- [9] "Percentage of internet users in selected countries who watch online video content every day as of January 2018," Statista, <https://www.statista.com/statistics/319688/daily-online-video-usage/>, 2018.
- [10] Video Codec for Audiovisual Services at px64 kbit/s Version 1, document ITU-T Rec. H.261, ITU-T, 1990.
- [11] Generic Coding of Moving Pictures and Associated Audio Infor-

- mation—Part 2: Video, document ITU-T Rec. H.262, ISO/IEC 13818-2 (MPEG-2), ITU-T and ISO/IEC JTC1, 1994.
- [12] Video Coding for Low Bit Rate Communication Version 1, document ITU-T Rec. H.263, ITU-T, 1995.
- [13] Coding of Audio-Visual Objects—Part 2: Visual, document ISO/IEC JTC1, ISO/IEC 14496-2 (MPEG-4 Visual Version 2), Dec. 2001.
- [14] Draft ITU-T Recommendation and Final Draft International Standard of Joint Video Specification, document ITU-T Rec. H.264/ISO/IEC 14496-10 AVC, Joint Video Team (JVT) of ISO/IEC MPEG and ITU-T VCEG, JVTG050, May 2003.
- [15] B. Bross, W.-J. Han, G. J. Sullivan, J.-R. Ohm, and T. Wiegand, High Efficiency Video Coding (HEVC) Text Specification Draft 9, document JCTVC-K1003, ITU-T/ISO/IEC Joint Collaborative Team on Video Coding (JCT-VC), Oct. 2012.
- [16] T. Sharp, “An Implementation of Key-Based Digital Signal Steganography,” in *Proc. Information Hiding 2001 (IH'01), Lecture Notes in Computer Science*, Berlin, Heidelberg, pp. 13–26, 2001.
- [17] J. Mielikainen, “LSB matching revisited,” *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 13, no. 5, pp. 285–287, 2006.
- [18] B. Chen and G. W. Wornell, “An information-theoretic approach to the design of robust digital watermarking systems,” in *Proc. 1999 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP'99)*, Piscataway, NJ, USA, 1999, vol. 4, pp. 2061–2064.
- [19] B. Chen and G. W. Wornell, “Quantization index modulation: a class of provably good methods for digital watermarking and information embedding,” *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 47, no. 4, pp. 1423–1443, 2001.
- [20] I. J. Cox, J. Kilian, F. T. Leighton, and T. Shamoan, “Secure spread spectrum watermarking for multimedia,” *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 6, no. 12, pp. 1673–1687, 1997.
- [21] L. M. Marvel, C. G. Boncelet, and C. T. Retter, “Spread spectrum image steganography,” *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 8, no. 8, pp. 1075–1083, 1999.
- [22] F. Hartung and B. Girod, “Watermarking of uncompressed and compressed video,” *Signal Processing*, vol. 66, no. 3, pp. 283–301, 1998.
- [23] “MSU StegoVideo”, [http://www.compression.ru/video/stego\\_video/index\\_en.html](http://www.compression.ru/video/stego_video/index_en.html)
- [24] Y. Hu, C. Zhang, and Y. Su, “Information hiding based on intra prediction modes for H.264/AVC,” in *Proc. 2007 IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME'07)*, Piscataway, NJ, USA, 2007, pp. 1231–1234.
- [25] Y. Hu, C. Zhang, and Y. Su, “Information Hiding for H.264/AVC,” *Chinese Journal of Electronics*, vol. 36, no. 4, pp. 690–694, 2008.  
(胡洋, 张春田, 苏育挺, “基于 H.264/AVC 的视频信息隐藏算法,” *电子学报*, vol. 36, no. 4, pp. 690–694, 2008.)
- [26] G. Yang, J. Li, Y. He, and Z. Kang, “An information hiding algorithm based on intra-prediction modes and matrix coding for H.264/AVC video stream,” *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, vol. 65, no. 4, pp. 331–337, 2011.
- [27] J. Wang, R. Wang, W. Li, D. Xu, and M. Huang, “An Information Hiding Algorithm for HEVC Based on Intra Prediction Mode and Block Code,” *Sensors & Transducers*, vol. 177, no. 8, pp. 230–237, 2014.
- [28] S. Bouchama, L. Hamami, and H. Aliane, “H.264/AVC Data Hiding Based on Intra Prediction Models for Real-time Applications,” in *Proc. the World Congress on Engineering and Computer Science (WCECS'12)*, 2012, vol. 1, pp. 655–658.
- [29] D. Xu, R. Wang, and J. Wang, “Prediction mode modulated data-hiding algorithm for H.264/AVC,” *Journal of Real-Time Image Processing*, vol. 7, no. 4, p. 205, Dec. 2012.
- [30] S. K. Kapotas and A. N. Skodras, “A new data hiding scheme for scene change detection in H.264 encoded video sequences,” in *Proc. 2008 IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME'08)*, Piscataway, NJ, USA, 2008, pp. 277–280.
- [31] X. Yang, L. Zhao, and K. Niu, “An efficient video steganography algorithm based on sub-macroblock partition for H.264/AVC,” in *Advanced Materials Research*, Pfaffikon, Switzerland, 2012, vol. 433, pp. 5384–5389.
- [32] H. Zhang, Y. Cao, X. Zhao, W. Zhang, and N. Yu, “Video Steganography with Perturbed Macroblock Partition,” in *Proceedings of the 2nd ACM Workshop on Information Hiding and Multimedia Security (IH&MMSec'14)*, Salzburg, Austria, 2014, pp. 115–122.
- [33] F. Jordan, “Proposal of a watermarking technique for hiding/retrieving data in compressed and decompressed video,” ISO/IEC Doc. JTC1/SC 29/QWG 11 MPEG 97/M 2281, 1997.
- [34] C. Xu, X. Ping, and T. Zhang, “Steganography in compressed video stream,” in *Proc. 2006 IEEE 1st International Conference on Innovative Computing, Information and Control (ICICIC'06)*, Piscataway, NJ, USA, 2006, vol. 1, pp. 269–272.
- [35] D. Fang and L. Chang, “Data hiding for digital video with phase of motion vector,” in *Proc. 2006 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS'06)*, Piscataway, NJ, USA, 2006, pp. 1422–1425.
- [36] H. A. Aly, “Data hiding in motion vectors of compressed video based on their associated prediction error,” *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, vol. 6, no. 1, pp. 14–18, 2011.
- [37] H. Jing, X. He, Q. Han, and X. Niu, “Motion Vector Based Information Hiding Algorithm for H.264/AVC against Motion Vector Steganalysis,” in *Proc. the 4th Asian Conference on Intelligent Information and Database Systems (ACIIDS'12)*, Lecture Notes in Computer Science, Berlin, Heidelberg, 2012, pp. 91–98.
- [38] B. Hao, L. Zhao, and W. Zhong, “A novel steganography algorithm based on motion vector and matrix encoding,” in *Proc. 2011 IEEE 3rd International Conference on Communication Software and Networks (ICCSN'11)*, Piscataway, NJ, USA, 2011, pp. 406–409.
- [39] Y. Cao, X. Zhao, D. Feng, and R. Sheng, “Video Steganography with Perturbed Motion Estimation,” in *Proc. Information Hiding 2011 (IH'11)*, Lecture Notes in Computer Science, Berlin, Heidelberg, 2011, pp. 193–207.
- [40] Y. Cao, X. Zhao, F. Li, and N. Yu, “Video steganography with multi-path motion estimation,” in *Proc. SPIE 8665, Media Watermarking, Security, and Forensics 2013*, Bellingham, WA, USA, 2013, p. 86650K–86650K.
- [41] Y. Yao, W. Zhang, N. Yu, and X. Zhao, “Defining embedding distortion for motion vector-based video steganography,” *Multimedia*

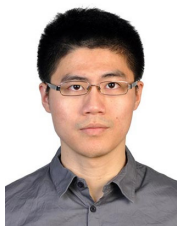
- Tools and Applications*, vol. 74, no. 24, pp. 11163–11186, 2015.
- [42] Y. Cao, H. Zhang, X. Zhao, and H. Yu, “Covert Communication by Compressed Videos Exploiting the Uncertainty of Motion Estimation,” *IEEE Communications Letters*, vol. 19, no. 2, pp. 203–206, 2015.
  - [43] H. Zhang, Y. Cao, and X. Zhao, “Motion vector-based video steganography with preserved local optimality,” *Multimedia Tools and Applications*, vol. 75, no. 21, pp. 13503–13519, 2016.
  - [44] Y. Cao, H. Zhang, X. Zhao, and H. Yu, “Video steganography based on optimized motion estimation perturbation,” in *Proc. the 3rd ACM Workshop on Information Hiding and Multimedia Security (IH&MMSec’15)*, New York, NY, USA, 2015, pp. 25–31.
  - [45] K. Wong and K. Tanaka, “A data hiding method using Mquant in MPEG domain,” *IEEE Transactions on Image Electronics and Visual Computing*, vol. 37, no. 3, pp. 256–267, 2008.
  - [46] K. Wong, K. Tanaka, K. Takagi, and Y. Nakajima, “Complete video quality-preserving data hiding,” *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 19, no. 10, pp. 1499–1512, 2009.
  - [47] T. Shanableh, “Data hiding in MPEG video files using multivariate regression and flexible macroblock ordering,” *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, vol. 7, no. 2, pp. 455–464, 2012.
  - [48] X. Ma, Z. Li, H. Tu, and B. Zhang, “A data hiding algorithm for H.264/AVC video streams without intra-frame distortion drift,” *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 20, no. 10, pp. 1320–1330, 2010.
  - [49] T.-J. Lin, K.-L. Chung, P.-C. Chang, Y.-H. Huang, H.-Y. M. Liao, and C.-Y. Fang, “An improved DCT-based perturbation scheme for high capacity data hiding in H.264/AVC intra frames,” *Journal of Systems and Software*, vol. 86, no. 3, pp. 604–614, 2013.
  - [50] P.-C. Chang, K.-L. Chung, J.-J. Chen, C.-H. Lin, and T.-J. Lin, “A DCT/DST-based error propagation-free data hiding algorithm for HEVC intra-coded frames,” *Journal of Visual Communication and Image Representation*, vol. 25, no. 2, pp. 239–253, 2014.
  - [51] A. Neufeld and A. D. Ker, “A study of embedding operations and locations for steganography in H.264 video,” in *Proc. SPIE 8665, Media Watermarking, Security, and Forensics 2013*, Bellingham, WA, USA, 2013, p. 86650J–86650J.
  - [52] K. Liao, S. Lian, Z. Guo, and J. Wang, “Efficient information hiding in H.264/AVC video coding,” *Telecommunication Systems*, vol. 49, no. 2, pp. 261–269, 2012.
  - [53] S. M. Kim, S. B. Kim, Y. Hong, and C. S. Won, “Data hiding on H.264/AVC compressed video,” in *International Conference Image Analysis and Recognition (ICIAR’07)*, pp. 698–707, 2007.
  - [54] J. Fridrich and J. Kodovsky, “Rich Models for Steganalysis of Digital Images,” *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, vol. 7, no. 3, pp. 868–882, 2012.
  - [55] J. Kodovsky and J. Fridrich, “Steganalysis of JPEG images using rich models,” in *Proc. SPIE 8303, Media Watermarking, Security, and Forensics 2012*, Bellingham, WA, USA, 2012, pp. 83030A–83030A.
  - [56] T. Denemark, V. Sedighi, V. Holub, R. Cogranne, and J. Fridrich, “Selection-channel-aware rich model for Steganalysis of digital images,” in *Proc. 2014 IEEE International Workshop on Information Forensics and Security (WIFS’14)*, Piscataway, NJ, USA, 2014, pp. 48–53.
  - [57] V. Holub and J. Fridrich, “Random Projections of Residuals for Digital Image Steganalysis,” *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, vol. 8, no. 12, pp. 1996–2006, 2013.
  - [58] W. Tang, H. Li, W. Luo, and J. Huang, “Adaptive Steganalysis Based on Embedding Probabilities of Pixels,” *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, vol. 11, no. 4, pp. 734–745, 2016.
  - [59] V. Holub, “Phase-aware projection model for steganalysis of JPEG images,” in *Media Watermarking, Security, and Forensics 2015*, 2015, vol. 9409, p. 94090T.
  - [60] X. Song, F. Liu, C. Yang, X. Luo, and Y. Zhang, “Steganalysis of Adaptive JPEG Steganography Using 2D Gabor Filters,” in *Proceedings of the 3rd ACM Workshop on Information Hiding and Multimedia Security (IH&MMSec’15)*, Portland, Oregon, USA, 2015, pp. 15–23.
  - [61] V. Holub and J. Fridrich, “Low-Complexity Features for JPEG Steganalysis Using Undecimated DCT,” *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, vol. 10, no. 2, pp. 219–228, 2015.
  - [62] A. D. Ker, P. Bas, and B. Ouml, “Moving Steganography and Steganalysis from the Laboratory into the Real World,” in *Proc. the 1st ACM Workshop on Information Hiding and Multimedia Security (IH&MMSec’13)*, New York, NY, USA, 2013, pp. 45–58.
  - [63] J. Kodovsky, V. Sedighi, and J. Fridrich, “Study of cover source mismatch in steganalysis and ways to mitigate its impact,” in *Proc. SPIE 9028, Media Watermarking, Security, and Forensics 2014*, Bellingham, WA, USA, 2014, p. 90280J–90280J.
  - [64] T. Wiegand, G. J. Sullivan, G. Bjontegaard, and A. Luthra, “Overview of the H.264/AVC video coding standard,” *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 13, no. 7, pp. 560–576, 2003.
  - [65] J. Fridrich and D. Soukal, “Matrix embedding for large payloads,” in *Proc. SPIE 6072, Security, Steganography, and Watermarking of Multimedia Contents VIII*, Bellingham, WA, USA, 2006, p. 60721W–60721W.
  - [66] Y. Kim, Z. Duric, and D. Richards, “Modified Matrix Encoding Technique for Minimal Distortion Steganography,” in *Proc. Information Hiding 2006 (IH’06)*, Lecture Notes in Computer Science, Berlin, Heidelberg, 2007, pp. 314–327.
  - [67] J. Fridrich, M. Goljan, P. Lisonek, and D. Soukal, “Writing on wet paper,” *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 53, no. 10, pp. 3923–3935, 2005.
  - [68] W. Zhang, X. Zhang, and S. Wang, “Maximizing Steganographic Embedding Efficiency by Combining Hamming Codes and Wet Paper Codes,” in *Proc. Information Hiding 2008 (IH’08)*, Lecture Notes in Computer Science, Berlin, Heidelberg, 2008, pp. 60–71.
  - [69] T. Filler, “Minimizing embedding impact in steganography using trellis-coded quantization,” in *Media Forensics and Security II*, 2010, vol. 7541, p. 754105.
  - [70] T. Filler, “Minimizing additive distortion in steganography using syndrome-trellis codes,” *IEEE Transactions on Information Foren-*



- sics and Security, vol. 6, no. 3, pp. 920–935, 2011.
- [71] N. F. Johnson and S. Katzenbeisser, “A survey of steganographic techniques,” in *Information hiding (IH)*, Norwood, MA, 2000, pp. 43–78.
- [72] A. Westfeld, “F5—A Steganographic Algorithm,” in *Proc. Information Hiding 2001 (IH’01)*, Lecture Notes in Computer Science, Berlin, Heidelberg, 2001, pp. 289–302.
- [73] A. Gretton, K. M. Borgwardt, M. Rasch, and Schöuml, “A kernel method for the two-sample-problem,” in *Advances in neural information processing systems (NIPS’06)*, Cambridge, MA, USA, 2006, pp. 513–520.
- [74] C. Cachin, “An Information-Theoretic Model for Steganography,” in *Proc. Information Hiding 1998 (IH’98)*, Lecture Notes in Computer Science, Berlin, Heidelberg, 1998, pp. 306–318.
- [75] C. Zhang, Y. Su, and C. Zhang, “A New Video Steganalysis Algorithm against Motion Vector Steganography,” in *Proc. 2008 IEEE 4th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM’08)*, Piscataway, NJ, USA, 2008, pp. 1–4.
- [76] Y. Su, C. Zhang, and C. Zhang, “A video steganalytic algorithm against motion-vector-based steganography,” *Signal Processing*, vol. 91, no. 8, pp. 1901–1909, 2011.
- [77] Y. Deng, Y. Wu, H. Duan, and L. Zhou, “Digital video steganalysis based on motion vector statistical characteristics,” *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, vol. 124, no. 14, pp. 1705–1710, 2013.
- [78] L. Wang, M. Wang, L. Zhai, and Y. Ren, “H.264/AVC Video Steganalysis Algorithm Based on Motion Vector Abnormal Correlation,” *Chinese Journal of Electronics*, vol. 42, no. 8, pp. 1457–1464, 2014.  
(王丽娜, 王旻杰, 翟黎明, 任延珍, “基于相关性异常的 H.264/AVC 视频运动矢量隐写分析算法,” *电子学报*, vol. 42, no. 8, pp. 1457–1464, 2014.)
- [79] K. Tasdemir, F. Kurugollu, and S. Sezer, “Spatio-Temporal Rich Model-Based Video Steganalysis on Cross Sections of Motion Vector Planes,” *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 25, no. 7, pp. 3316–3328, 2016.
- [80] H. Wu, Y. Liu, J. Huang, and X. Yang, “Improved steganalysis algorithm against motion vector based video steganography,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Image Processing (ICIP’14)*, 2014, pp. 5512–5516.
- [81] X. Xu, J. Dong, W. Wang, and T. Tan, “Video steganalysis based on the constraints of motion vectors,” in *Proc. 2013 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP’13)*, Piscataway, NJ, USA, 2013, pp. 4422–4426.
- [82] J. Kodovsky and J. Fridrich, “Calibration revisited,” in *Proc. the 11th ACM workshop on Multimedia and security (MMSec’09)*, New York, NY, USA, 2009, pp. 63–74.
- [83] Y. Cao, X. Zhao, and D. Feng, “Video steganalysis exploiting motion vector reversion-based features,” *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 19, no. 1, pp. 35–38, 2012.
- [84] K. Wang, H. Zhao, and H. Wang, “Video steganalysis against motion vector-based steganography by adding or subtracting one motion vector value,” *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, vol. 9, no. 5, pp. 741–751, 2014.
- [85] Y. Deng, Y. Wu, and L. Zhou, “Digital video steganalysis using motion vector recovery-based features,” *Applied Optics*, vol. 51, no. 20, pp. 4667–4677, 2012.
- [86] Y. Ren, L. Zhai, L. Wang, and T. Zhu, “Video steganalysis based on subtractive probability of optimal matching feature,” in *Proc. the 2nd ACM Workshop on Information Hiding and Multimedia Security (IH&MMSec’14)*, New York, NY, USA, 2014, pp. 83–90.
- [87] P. Wang, Y. Cao, X. Zhao, and B. Wu, “Motion vector reversion-based steganalysis revisited,” in *Proc. 2015 IEEE China Summit and International Conference on Signal and Information Processing (ChinaSIP’15)*, Piscataway, NJ, USA, 2015, pp. 463–467.
- [88] L. Zhai, L. Wang, and Y. Ren, “Combined and Calibrated Features for Steganalysis of Motion Vector-Based Steganography in H.264/AVC,” in *Proceedings of the 5th ACM Workshop on Information Hiding and Multimedia Security (IH&MMSec’17)*, Philadelphia, Pennsylvania, USA, 2017, pp. 135–146.
- [89] H. Zhang, Y. Cao, and X. Zhao, “A Steganalytic Approach to Detect Motion Vector Modification Using Near-Perfect Estimation for Local Optimality,” *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, vol. 12, no. 2, pp. 465–478, 2017.
- [90] G. J. Sullivan and T. Wiegand, “Rate-distortion optimization for video compression,” *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 15, no. 6, pp. 74–90, 1998.
- [91] A. Ortega and K. Ramchandran, “Rate-distortion methods for image and video compression,” *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 15, no. 6, pp. 23–50, 1998.
- [92] P. Wang, Y. Cao, X. Zhao, and H. Yu, “An adaptive detecting strategy against motion vector-based steganography,” in *Proc. 2015 IEEE Int. Conf. Multimedia and Expo (ICME’15)*, 2015, pp. 1–6.
- [93] P. Wang, Y. Cao, and X. Zhao, “Segmentation Based Video Steganalysis to Detect Motion Vector Modification,” *Security and Communication Networks*, vol. 2017, pp. 8051389:1–8051389:12, 2017.
- [94] S. Li, H. Deng, H. Tian, and Q. Dai, “Steganalysis of prediction mode modulated data-hiding algorithms in H.264/AVC video stream,” *Annals of Telecommunications - Annales Des Télécommunications*, vol. 69, no. 7–8, pp. 461–473, 2014.
- [95] Y. Zhao, H. Zhang, Y. Cao, P. Wang, and X. Zhao, “Video Steganalysis Based on Intra Prediction Mode Calibration,” in *Proc. the 14th International Workshop on Digital-Forensics and Watermarking (IWDW’15)*, Lecture Notes in Computer Science, Berlin, Heidelberg, pp. 119–133, Jan. 2016.
- [96] P. Wang, Y. Cao, X. Zhao, and M. Zhu, “A Steganalytic Algorithm to Detect DCT-based Data Hiding Methods for H.264/AVC Videos,” in *Proceedings of the 5th ACM Workshop on Information Hiding and Multimedia Security (IH&MMSec’17)*, Philadelphia, Pennsylvania, USA, 2017, pp. 123–133.
- [97] 张弘, 曹纭, 赵险峰. 基于帧间预测模式回复特性检测的视频隐写分析方法:中国, 201711021119.7 [P]. 2018-02-09.
- [98] 张弘, 曹纭, 赵险峰. 基于量化参数奇异值检测的视频隐写分析方法和装置:中国, 201710805983.X [P]. 2018-01-19.

- [99] W. You, Y. Cao, and X. Zhao, "Information Hiding Using CAVLC: Misconceptions and a Detection Strategy," in *Proc. the 16th Interna-*

*tional Workshop on Digital-Forensics and Watermarking (IWDW'17)*, Lecture Notes in Computer Science, Cham, 2017, pp. 187–201.



**张弘** 2017 年在中国科学院大学信息安全专业获得博士学位。现任中国科学院信息工程研究所助理研究员。研究领域为多媒体安全、视频编解码、机器学习。研究兴趣包括: 媒体安全与智能分析。Email: zhanghong@iie.ac.cn



**尤玮珂** 2015 年在北京邮电大学网络工程专业获得学士学位。现在中国科学院大学信息安全专业攻读博士学位。研究领域为多媒体安全、深度学习、视频编解码。研究兴趣包括: 媒体安全与智能分析。Email: youweike@iie.ac.cn



**赵险峰** 中国科学院信息工程研究所研究员, 中国科学院大学网络空间安全学院教授, 博士生导师。2003 年于上海交通大学电子信息工程学院获得博士学位, 研究方向为信息隐藏、多媒体取证与内容安全分析等。任 IJDCF、IWDW、IWDCF 等期刊、会议的编委或程序委员会委员, 任中国电子学会通信与信息安全专委会、中国图像图形学会多媒体取证与安全专委会等相关学术组织的委员。曾承担国家与部委项目 40 余项, 在 IEEE TIFS、ACM IH & MMSec 等所属领域重要刊物和会议上发表论文 150 余篇, 获得与申请专利 29 项, 撰写或参与撰写著作 5 部, 主持研制的系统有重要应用, 获保密科学技术奖(部级)一等奖、中科院“朱李月华”优秀教师、“IGI Global's Annual Excellence in Research”等荣誉。Email: zhaoxianfeng@iie.ac.cn