

基于运动角度的视频帧删除检测算法及其证据效力规范

王康庆, 夏立款, 李硕

引用本文

王康庆, 夏立款, 李硕. 基于运动角度的视频帧删除检测算法及其证据效力规范[J]. 计算机科学, 2025, 52(8): 363-373.

WANG Kangqing, XIA Likuan, LI Shuo. [Motion-angle-based Video Frame Deletion Detection Algorithm and Its Evidentiary Validity Standards](#) [J]. Computer Science, 2025, 52(8): 363-373.

相似文章推荐 (请使用火狐或 IE 浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

[基于多模态特征小波分解的深度学习股价概率预测](#)

Deep Learning Stock Price Probability Prediction Based on Multi-modal Feature Wavelet Decomposition

计算机科学, 2025, 52(6A): 240600140-11. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.240600140>

[基于HMM-NN的用户点击流识别](#)

Click Streams Recognition for Web Users Based on HMM-NN

计算机科学, 2022, 49(7): 340-349. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.210600127>

[基于隐半马尔可夫模型的微博流行信息检测方法](#)

Microblog Popular Information Detection Based on Hidden Semi-Markov Model

计算机科学, 2022, 49(6A): 291-296. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.210800011>

[基于隐马尔可夫模型的铁路出行团体关系预测研究](#)

Relation Prediction for Railway Travelling Group Based on Hidden Markov Model

计算机科学, 2022, 49(6A): 247-255. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.210500001>

[ADCSM:一种细粒度汽车行驶工况模型构建方法](#)

ADCSM:A Fine-grained Driving Cycle Model Construction Method

计算机科学, 2021, 48(6A): 289-294. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.200600019>

基于运动角度的视频帧删除检测算法及其证据效力规范

王康庆¹ 夏立款² 李 硕³

1 中国政法大学刑事司法学院 北京 100088

2 国家法官学院 北京 100070

3 中国人民公安大学 北京 100088

(cu212034@cupl.edu.cn)

摘要 近年来视频恶意篡改行为屡见不鲜,已对电子证据的真实性与可靠性提出严峻挑战。其中,视频帧删除篡改行为可以掩盖事实真相,对视频类电子证据的破坏尤为严重。因此,帧删除检测问题受到越来越多的关注。目前,主流帧删除检测方法主要依赖帧删除行为在时域所产生的内容连续性衰减来甄别篡改视频。然而视频的时域信息较为复杂,通过时域内容连续性衰减来捕捉帧删除痕迹的方法并不稳定。针对此问题,以视频中运动目标的运动角度为研究对象,建立了一阶马尔可夫模型,推导出频域马尔可夫连续性衰减痕迹;随后基于频域马尔可夫连续性衰减痕迹,提出了一种基于时频分析技术的视频帧删除检测算法。实验结果表明:相较于时域连续性衰减痕迹,基于频域连续性衰减痕迹的视频帧删除检测算法具有更加优越的取证性能。在此基础上,从证据合法性、证据真实性以及证据关联性维度构建的法律规范框架,为数字时代电子证据规则的完善提供了理论参考,实现了技术正义与程序正义的双重目标。

关键词 帧删除检测;运动角度;马尔可夫模型;连续性衰减痕迹;时频分析;证据效力

中图分类号 TP391.41

Motion-angle-based Video Frame Deletion Detection Algorithm and Its Evidentiary Validity Standards

WANG Kangqing¹, XIA Likuan² and LI Shuo³

1 School of Criminal Justice, China University of Political Science and Law, Beijing 100088, China

2 National Judges College, Beijing 100070, China

3 People's Public Security University of China, Beijing 100088, China

Abstract In recent years, malicious video tampering has become increasingly prevalent, posing severe challenges to the authenticity and reliability of electronic evidence. Among such tampering methods, video frame deletion, which can obscure factual truth, proves particularly destructive to video-based electronic evidence. Consequently, frame deletion detection has attracted growing research attention. Current mainstream detection methods primarily rely on identifying content continuity degradation in the temporal domain caused by frame deletion. However, the complexity of temporal information in videos makes such temporal continuity-based detection approaches unstable. To address this issue, this paper focuses on motion patterns of objects in videos. By establishing a first-order Markov model, it derives frequency-domain Markov continuity decay traces. Subsequently, based on these frequency-domain traces, this paper proposes a video frame deletion detection algorithm utilizing time-frequency analysis techniques. Experimental results demonstrate that compared with temporal continuity decay traces, the frequency-domain continuity decay-based detection algorithm exhibits superior forensic performance. Building upon this technical advancement, this research further constructs a legal framework from perspectives of evidence legality, evidence authenticity, and evidence relevance, providing theoretical references for improving electronic evidence regulations in the digital era. This dual approach achieves both technological justice and procedural justice objectives.

Keywords Frame deletion detection, Passive evidence collection, Markov model, Continuous attenuation traces, Time-frequency analysis, Evidentiary validity

到稿日期:2025-05-14 返修日期:2025-07-09

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金(24CXTD02);国家社科基金重点项目(22AFX009);中国政法大学校级项目(23624199)

This work was supported by the Special Fund for Basic Scientific Research Operating Expenses of Central Universities(24CXTD02), Key Project of the National Social Science Foundation of China(22AFX009) and University-Level Project of China University of Political Science and Law(23624199).

通信作者:夏立款(lkx419521@163.com)

1 引言

数字视频的蓄意篡改会严重影响电子证据的可信度^[1],对证据的合法性、真实性和关联性构成严峻挑战。因此,规范数字视频的取证工作具有重要意义。在各种篡改手段中,帧删除篡改对电子证据的破坏性较强,例如将记录嫌疑人犯罪过程的片段进行恶意删除会导致证据失效。由此可见,视频的帧删除检测问题亟待解决。帧删除检测算法主要依赖于删除部分帧后,视频所产生的连续性衰减痕迹。目前学者主要从两个方面提取伪造视频的连续性衰减痕迹:数字视频编码的连续性衰减和数字视频内容的连续性衰减。

Wang 等^[2]首先发现帧删除在重压缩过程中遗留的连续性衰减痕迹:运动残差编码会呈周期性传递,表现为运动残差直方图中的显著尖峰。受上述工作的启发,Su 等^[3]构造运动补偿边缘伪影(Motion Compensation Edge Artifact, MCEA)特征来实现帧删除检测。该方法首先计算单帧视频中每个编码块的离散余弦变换(Discrete Cosine Transform, DCT)系数并求和,得到 MCEA 特征;随后通过与相邻 MCEA 特征取商值来度量连续性衰减程度。这两种方法在捕捉连续性衰减痕迹问题上取得了一定效果,但是仅适用于 MPEG 编码格式的视频。当编码格式改变,这两种方法的检测能力将大大降低。为了提高方法的适用性,Vazquezpadin 等^[4]通过检测缺失帧造成的视频码率的连续性衰减来检测帧删除。该方法通过构造一种新的判别特征 VPF(Variation of Prediction Footprint)来检测 P 帧的预测子块在 GOP(Group of Picture)、比特率以及编码参数方面所产生的连续性衰减。该算法实现了检测 H. 264 视频的帧删除篡改,提升了算法的适用度。上述方法较为注重判别特征的提取,用于捕捉帧删除篡改痕迹。然而,视频中存在的噪声干扰等因素可能会影响判别特征的效果。Feng 等^[5]考虑到这一因素,并且发现视频抖动等干扰同样会使视频编码出现连续性衰减现象,因此详细讨论了噪声干扰对取证特征的影响,并强调使用预处理方法来去除干扰,用于提升取证特征的取证性能,并取得了良好检测效果。Shanableh^[6]提出使用机器学习方法来提高辨别能力,首先提取帧内编码宏块的预测残差等 9 种可能产生连续性衰减的特征送入支持向量机(Support Vector Machine, SVM)训练,实现真实视频与篡改视频的模式识别。

综上所述,基于视频编码的连续性衰减痕迹进行帧删除检测的算法针对特定编码方式设计,存在着算法适用性较为局限的问题。考虑到这个问题,学者试图提取视频内容中的连续性衰减痕迹来进行帧删除检测。

Zhang 等^[7]试图捕捉相邻帧图像纹理所产生的连续性衰减,首先提取每帧图像的局部二值模式(Local Binary Pattern, LBP)特征,随后计算相邻帧 LBP 特征的相关系数来表征连续性衰减。由于连续帧的缺失,纹理可能会发生较大变化,进而使 LBP 特征的相关系数变小。类似地,文献[8-9]分别利用互信息(Mutual Information, MI)特征和结构相似度(Structural Similarity)特征来捕捉篡改视频内容出现的连续性衰减。Liu 等^[10]利用 Zernike 矩将 RGB 三维色彩空间转换为 2D,然后以 2D 色彩空间中每帧色彩的粗糙度来

表征连续性衰减。

上述方法主要挖掘视频帧静态特征所产生的连续性衰减痕迹。相较于静态特征,视频中的运动目标可以更有效地表征视频的时域动态特性,因此对于帧删除所造成的连续性衰减更加敏感。基于此,学者开始探究运动目标所产生的连续性衰减痕迹。

Conotter 等^[11]首先对视频中抛物线轨迹的运动目标进行几何建模,确定目标的合理运动轨道。随后,通过与伪造视频中的运动目标的异常运动轨迹进行对比,确定抛物线轨迹目标的连续性衰减痕迹。该方法主要针对抛物线轨迹运动目标视频进行甄别。与此相比,基于运动估计的运动残差特征具有更广泛的应用范围。文献[12-13]首先对相邻两帧间的运动目标进行光流估计,得到光流场序列。连续帧删除会导致运动估计突然增大,因此将每个光流场内的光流幅值相加,并在时域方向进行比较,从而捕捉到光流场的连续性衰减痕迹。在光流场的基础上,Li 等^[14]通过对光流的运动方向进行深入估计,构造出一种伪相位光流场特征来捕捉运动目标在运动方向上的连续性衰减痕迹。相较于运动幅度,运动方向的变化更加稳定。因此,运动方向所产生的连续性衰减更加显著,算法性能得到了进一步提升。针对静态内容视频帧删除检测,Bao 等^[15]设计了一种帧间噪声传递矩阵作为检测特征,通过检测传递矩阵的异常变化来捕捉伪造视频的连续性衰减痕迹。实验分析表明,该方法对于静态内容视频的帧删除篡改检测具有良好效果。

值得一提的是,近年来由于深度学习的快速发展,使用深度神经网络来进行帧删除检测的算法也相继出现。Gowda 等^[16]首先采用 3D-CNN 来提取帧间残差特征,随后提出一种绝对差分算法来去除残差特征的冗余,进而实现连续性衰减痕迹的捕捉。Li 等^[17]采用对比学习模型,将相邻两帧间运动估计与相邻数帧间运动估计分别送入网络进行对比训练,通过残差特征连续性衰减程度的差异性使得网络具有捕捉连续性衰减痕迹的能力。Feng 等^[18]提出一种 MSDCNN-LSTM 网络,首先利用 3DCNN 模块提取帧间运动残差,随后利用 LSTM 的时序记忆性来分析运动残差的连续性衰减程度,从而训练出能够甄别伪造视频的网络。事实上,目前基于深度学习的算法也主要依赖于内容的时域连续性衰减特征来训练神经网络,以达到检测的目的。

然而,当前基于内容连续性衰减的算法仍然具有一些局限性。首先,当前算法缺乏理论模型描述,因此“连续性衰减”这一概念较为模糊,需要找到合适的模型来刻画“连续性衰减”的含义。其次,当前算法大多聚焦于在时域方向上捕捉连续性衰减痕迹。然而,由于视频内容复杂多变,复杂的内容同样可以引起“连续性衰减”,因此,算法设计有必要考虑区分由帧删除引起的“连续性衰减”和由内容引起的“连续性衰减”。尽管文献[14]通过设计更加稳定的取证特征来凸显帧删除引起的连续性衰减痕迹,然而检测性能仍有提升空间。

针对这些问题,本文以文献[14]的工作为基础,以运动角度为研究目标,通过建立一阶马尔可夫模型来推导出频域马尔可夫连续性衰减痕迹,随后基于频域马尔可夫连续性衰减痕迹,提出了一种基于时频分析技术的视频帧删除检测算法。

本文的具体工作及贡献可以总结如下:

1)通过建立一阶马尔可夫模型来刻画视频的帧间连续性。经过深入分析与推导,得到频域马尔可夫连续性衰减痕迹作为取证线索。

2)提出了一种基于频域马尔可夫连续性衰减痕迹的帧删除检测算法。通过引入时频分析变换,对文献[14]中的运动角度特征加以改进,构造一种新颖的频域取证特征,用于捕捉帧删除所引起的连续性衰减痕迹。经过大量实验分析,证明了所提出算法的可行性与优越性。相比于基于时域的计算,频域连续性衰减特征可以区分出由帧删除和内容所引起的“连续性衰减”痕迹,算法的检测性能显著提升。

3)在法律规范方面,视频帧删除行为破坏的不仅是电子证据的真实性,更是对《刑事诉讼法》等法律所建构的证据合法性、真实性、关联性“三性”规范体系构成的系统挑战。因此,为有效弥合司法实践与技术标准之间的鸿沟,创新性地将频域马尔可夫连续性衰减痕迹的检测成果映射至法律证据效力维度,有力地建构起包含证据合法性、证据真实性与证据关联性三位一体的规范框架。具体而言,证据合法性关注的是技术认证与法律标准的衔接,证据真实性则聚焦技术结论与事实认定的联结,证据关联性则强调技术结论与案件事实逻辑的协同。上述规范框架体系为电子证据规则的完善提供了理论支撑,亦为新型检测算法的司法落地应用奠定了基础,继而实现了程序正义与技术正义的双重目标。

2 运动角度的频域连续性衰减痕迹

文献[14]通过对运动目标的运动强度变化建立一阶马尔可夫模型,用于对运动角度的时域连续性衰减痕迹加以阐述。本章在其工作基础上,进一步推导运动角度的频域连续性衰减痕迹。本章首先介绍一阶马尔可夫模型的时域和频域形式,随后进行频域连续性衰减痕迹的推导工作。

2.1 一阶马尔可夫模型

一阶马尔可夫模型是自回归移动平均过程的一种特殊情况^[19],旨在分析当前时刻变量值与前一时刻变量值间的关系。一阶马尔可夫序列的建模如下:

$$y_t = \phi y_{t-1} + \epsilon_t \quad (1)$$

其中, ϕ 定义为绝对值小于等于1的传递参数, ϵ_t 定义为高斯白噪声。观察式(1)可知,时域形式的一阶马尔可夫模型在 t 时刻的观测值 y_t 由两个因素决定: $t-1$ 时刻函数值 y_{t-1} 和高斯白噪声 ϵ_t 。图1展示了一阶马尔可夫模型的时域示意图(其中横坐标表示时间,纵坐标表示观测数据的归一化数据值)。通过观察图1可知:由于传递参数较小,每时刻观

$$\theta_{(x,y)}^{t+1} = \arccos \left[\frac{\rho_x' (v_x')^2 + \rho_y' (v_y')^2 + v_x' \xi_x' + v_y' \xi_y'}{\sqrt{(\rho_x' v_x')^2 + (\rho_y' v_y')^2 + 2\rho_x' v_x' \xi_x' + 2\rho_y' v_y' \xi_y' + (\xi_x')^2 + (\xi_y')^2} \sqrt{(v_x')^2 + (v_y')^2}} \right] \quad (3)$$

其中, ρ_x' 和 ρ_y' 分别表示水平方向和垂直方向上运动强度序列的传递系数; ξ_x' 和 ξ_y' 分别表示水平和垂直方向上的高斯随机

$$\theta_{(x,y)}^{t+k} = \arccos \left[\frac{(\rho_x')^k (v_x')^2 + (\rho_y')^k (v_y')^2 + v_x' \xi_x' + v_y' \xi_y'}{\sqrt{((\rho_x')^k v_x')^2 + ((\rho_y')^k v_y')^2 + 2(\rho_x')^k v_x' \xi_x' + 2(\rho_y')^k v_y' \xi_y' + (\xi_x')^2 + (\xi_y')^2} \sqrt{(v_x')^2 + (v_y')^2}} \right] \quad (4)$$

深入观察式(3)可知,角度变化主要受两个因素的影响:运动强度变化的传递系数和高斯随机扰动。为了突出这两个因素的影响,下文对运动角度 $\theta_{(x,y)}^{t+1}$ 的余弦值序列

测值在微小范围内变化,整个序列成为一个平稳变化的时序系统。

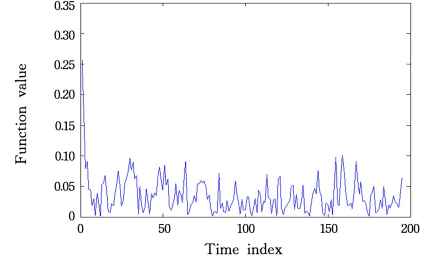


图1 时域一阶马尔可夫模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of first-order Markov model in time domain

相较于时域一阶马尔可夫模型对每一时刻观测值进行观察,其频域表示则是将整个序列看作留空整体,以度量序列变化的平稳性。一阶马尔可夫模型的频域表示如下^[19]:

$$s(\omega) = \frac{\delta^2}{2\pi[1 + \phi^2 - 2\phi\cos(\omega)]} \quad (2)$$

其中, ω 表示频率。图2展示了一阶马尔可夫模型的频域形式。观察图2可知,对于平稳变化的马尔可夫模型,其频谱会有一个明显的峰值,表征整个系统运行良好。

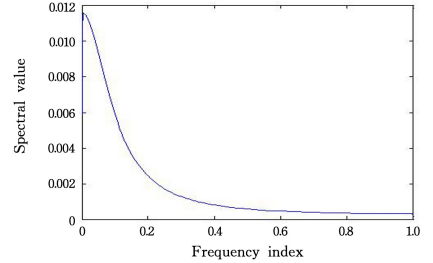


图2 频域一阶马尔可夫模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of first-order Markov model in frequency domain

2.2 运动角度的频域连续性衰减痕迹

本节在文献[14]的基础上,进一步推导运动角度的频域连续性衰减痕迹。为此,假设 p_x^y 表示第 t 帧中某个像素, $\mathbf{V}_t(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = (\mathbf{u}_t', \mathbf{v}_t')$ 表示像素 p_x^y 从 t 帧到 $t+1$ 帧的运动矢量,其中 \mathbf{u}_t' 表示水平方向上的运动强度, \mathbf{v}_t' 表示垂直方向上的运动强度。同时假设 $\mathbf{V}_{t+1}(x+\Delta x, y+\Delta y) = (\mathbf{u}_{t+\Delta x}', \mathbf{v}_{t+\Delta y}')$ 表示该像素从 $t+1$ 帧到 $t+2$ 帧的运动矢量, $\theta_{(x,y)}^{t+1}$ 表示像素 p_x^y 相邻帧间的一步角度。同理,相隔 k 帧的 k 步运动角度表示为 $\theta_{(x,y)}^{t+k}$ 。

根据文献[14]结论,一步角度 $\theta_{(x,y)}^{t+1}$ 可以表示为:

$$\theta_{(x,y)}^{t+1} = \arccos \left[\frac{\rho_x' (v_x')^2 + \rho_y' (v_y')^2 + v_x' \xi_x' + v_y' \xi_y'}{\sqrt{(\rho_x' v_x')^2 + (\rho_y' v_y')^2 + 2\rho_x' v_x' \xi_x' + 2\rho_y' v_y' \xi_y' + (\xi_x')^2 + (\xi_y')^2} \sqrt{(v_x')^2 + (v_y')^2}} \right] \quad (3)$$

扰动。

相应地,由递推可得 k 步角度为:

$$\theta_{(x,y)}^{t+k} = \arccos \left[\frac{(\rho_x')^k (v_x')^2 + (\rho_y')^k (v_y')^2 + v_x' \xi_x' + v_y' \xi_y'}{\sqrt{((\rho_x')^k v_x')^2 + ((\rho_y')^k v_y')^2 + 2(\rho_x')^k v_x' \xi_x' + 2(\rho_y')^k v_y' \xi_y' + (\xi_x')^2 + (\xi_y')^2} \sqrt{(v_x')^2 + (v_y')^2}} \right] \quad (4)$$

进行分析。

首先考虑两步运动角度和一步运动角度的关系。具体地,首先考虑两步角度变化 $\theta_{(x,y)}^{t+2}$ 的余弦值 $\cos(\theta_{(x,y)}^{t+2})$ 和一步

相位变化 $\theta_{(x,y)}^{t \rightarrow t+1}$ 的余弦值 $\cos(\theta_{(x,y)}^{t \rightarrow t+1})$ 的内在关系。显然, $\cos(\theta_{(x,y)}^{t \rightarrow t+1})$ 和 $\cos(\theta_{(x,y)}^{t \rightarrow t+2})$ 具有如下形式:

$$\cos(\theta_{(x,y)}^{t \rightarrow t+1}) = \frac{\rho'_x (v'_x)^2 + \rho'_y (v'_y)^2 + v'_x \xi'_x + v'_y \xi'_y}{\sqrt{(\rho'_x v'_x)^2 + (\rho'_y v'_y)^2 + 2\rho'_x v'_x \xi'_x + 2\rho'_y v'_y \xi'_y + (\xi'_x)^2 + (\xi'_y)^2}} \sqrt{(v'_x)^2 + (v'_y)^2} \quad (5)$$

$$\cos(\theta_{(x,y)}^{t \rightarrow t+2}) = \frac{(\rho'_x)^2 (v'_x)^2 + (\rho'_y)^2 (v'_y)^2 + v'_x \xi'_x + v'_y \xi'_y}{\sqrt{((\rho'_x)^2 v'_x)^2 + ((\rho'_y)^2 v'_y)^2 + 2(\rho'_x)^2 v'_x \xi'_x + 2(\rho'_y)^2 v'_y \xi'_y + (\xi'_x)^2 + (\xi'_y)^2}} \sqrt{(v'_x)^2 + (v'_y)^2} \quad (6)$$

首先观察式(5)的分子项可知,其包含4个分量: $(\rho'_y)^2 (v'_y)^2$ 表征运动强度变化系数对角度变化的演化作用, $(\rho'_x)^2 (v'_x)^2$ 和 $(\rho'_y)^2 (v'_y)^2$ 、 $v'_x \xi'_x$ 和 $v'_y \xi'_y$ 。这两部分分别表征 $v'_x \xi'_x$ 和 $v'_y \xi'_y$ 表征噪声干扰对角度变化的影响。因此对式(5)角度变化过程中不同的物理含义。其中, $(\rho'_x)^2 (v'_x)^2$ 和 $v'_x \xi'_x + v'_y \xi'_y$ 进一步分解可以得到如下等式:

$$\begin{aligned} \cos(\theta_{(x,y)}^{t \rightarrow t+2}) &= \frac{(\rho'_x)^2 (v'_x)^2 + (\rho'_y)^2 (v'_y)^2 + v'_x \xi'_x + v'_y \xi'_y}{\sqrt{((\rho'_x)^2 v'_x)^2 + ((\rho'_y)^2 v'_y)^2 + 2(\rho'_x)^2 v'_x \xi'_x + 2(\rho'_y)^2 v'_y \xi'_y + (\xi'_x)^2 + (\xi'_y)^2}} \sqrt{(v'_x)^2 + (v'_y)^2} \\ &= \frac{(\rho'_x)^2 (v'_x)^2 + (\rho'_y)^2 (v'_y)^2}{\sqrt{((\rho'_x)^2 v'_x)^2 + ((\rho'_y)^2 v'_y)^2 + 2(\rho'_x)^2 v'_x \xi'_x + 2(\rho'_y)^2 v'_y \xi'_y + (\xi'_x)^2 + (\xi'_y)^2}} \sqrt{(v'_x)^2 + (v'_y)^2} + \\ &\quad \frac{v'_x \xi'_x + v'_y \xi'_y}{\sqrt{((\rho'_x)^2 v'_x)^2 + ((\rho'_y)^2 v'_y)^2 + 2(\rho'_x)^2 v'_x \xi'_x + 2(\rho'_y)^2 v'_y \xi'_y + (\xi'_x)^2 + (\xi'_y)^2}} \sqrt{(v'_x)^2 + (v'_y)^2} \\ &= \cos(\theta_{(x,y)}^{t \rightarrow t+2})_\rho + \cos(\theta_{(x,y)}^{t \rightarrow t+2})_\xi \end{aligned} \quad (7)$$

其中, $\cos(\theta_{(x,y)}^{t \rightarrow t+2})_\rho$ 表示由运动强度变化系数控制的角度变化分量, $\cos(\theta_{(x,y)}^{t \rightarrow t+2})_\xi$ 则表示由噪声控制的角度变化分量。二者在物理意义方面有着本质区别: $\cos(\theta_{(x,y)}^{t \rightarrow t+2})_\rho$ 表征驱动序列演化的内在因素,这是由序列本身的性质所决定的;而 $\cos(\theta_{(x,y)}^{t \rightarrow t+2})_\xi$ 表征噪声对于序列演化的外在干扰。因此不失

一般性地,将 $\cos(\theta_{(x,y)}^{t \rightarrow t+2})_\xi$ 重新表示为服从高斯分布的干扰噪声 ξ_t 。

随后对 $\cos(\theta_{(x,y)}^{t \rightarrow t+2})_\rho$ 进行深入分析。由于 $\cos(\theta_{(x,y)}^{t \rightarrow t+2})_\rho$ 旨在表征序列演化规律的内在驱动,即在没有噪声干扰情况下序列演化的本质规律。因此,忽略高斯噪声 ξ_x 和 ξ_y 对 $\cos(\theta_{(x,y)}^{t \rightarrow t+2})_\rho$ 的影响,进而 $\cos(\theta_{(x,y)}^{t \rightarrow t+2})_\rho$ 可以近似为:

$$\begin{aligned} \cos(\theta_{(x,y)}^{t \rightarrow t+2})_\rho &= \frac{(\rho'_x)^2 (v'_x)^2 + (\rho'_y)^2 (v'_y)^2}{\sqrt{((\rho'_x)^2 v'_x)^2 + ((\rho'_y)^2 v'_y)^2 + 2(\rho'_x)^2 v'_x \xi'_x + 2(\rho'_y)^2 v'_y \xi'_y + (\xi'_x)^2 + (\xi'_y)^2}} \sqrt{(v'_x)^2 + (v'_y)^2} \\ &\approx \frac{(\rho'_x)^2 (v'_x)^2 + (\rho'_y)^2 (v'_y)^2}{\sqrt{((\rho'_x)^2 v'_x)^2 + ((\rho'_y)^2 v'_y)^2}} \sqrt{(v'_x)^2 + (v'_y)^2} \end{aligned} \quad (8)$$

将 $\cos(\theta_{(x,y)}^{t \rightarrow t+2})_\rho$ 进行变形,具体地,将 $\cos(\theta_{(x,y)}^{t \rightarrow t+2})_\rho$ 的分子和分母均除以 $\rho'_x + \rho'_y$,可以得到式(8)的等价变形如下:

$$\begin{aligned} \cos(\theta_{(x,y)}^{t \rightarrow t+2})_\rho &= \frac{(\rho'_x)^2 (v'_x)^2 + (\rho'_y)^2 (v'_y)^2}{\sqrt{((\rho'_x)^2 v'_x)^2 + ((\rho'_y)^2 v'_y)^2}} \sqrt{(v'_x)^2 + (v'_y)^2} \\ &= \frac{\frac{\rho'_x}{\rho'_x + \rho'_y} [\rho'_x (v'_x)^2] + \frac{\rho'_y}{\rho'_x + \rho'_y} [\rho'_y (v'_y)^2]}{\sqrt{\frac{(\rho'_x)^2}{(\rho'_x + \rho'_y)^2} (\rho'_x)^2 (v'_x)^2 + \frac{(\rho'_y)^2}{(\rho'_x + \rho'_y)^2} (\rho'_y)^2 (v'_y)^2}} \sqrt{(v'_x)^2 + (v'_y)^2} \end{aligned} \quad (9)$$

分别处理式(9)中的分子和分母项。令 $Num(\cos(\theta_{(x,y)}^{t \rightarrow t+2})_\rho)$ 表示式(9)的分子项, $Den(\cos(\theta_{(x,y)}^{t \rightarrow t+2})_\rho)$ 表示其分母项。假设 $\rho'_x < \rho'_y$, 且 $\rho'_y = \rho'_x + \Delta\rho$, 分别代入 $Num(\cos(\theta_{(x,y)}^{t \rightarrow t+2})_\rho)$ 和 $Den(\cos(\theta_{(x,y)}^{t \rightarrow t+2})_\rho)$, 可得:

$$\begin{aligned} Num(\cos(\theta_{(x,y)}^{t \rightarrow t+2})_\rho) &= \frac{\rho'_x}{\rho'_x + \rho'_y} \cdot [\rho'_x (v'_x)^2] + \frac{(\rho'_x + \Delta\rho)}{\rho'_x + \rho'_y} \cdot [\rho'_y (v'_y)^2] \\ &= \frac{\rho'_x}{\rho'_x + \rho'_y} \cdot [\rho'_x (v'_x)^2 + \rho'_y (v'_y)^2] + \frac{\Delta\rho}{\rho'_x + \rho'_y} \cdot \rho'_y (v'_y)^2 \end{aligned} \quad (10)$$

ρ'_x 和 ρ'_y 分别表征了极短时间内(通常是 1/25 和 1/30 秒)物体在水平和垂直方向上运动强度的变化。在如此短的时间内,二者间强度变化差异极小。因此忽略 $\Delta\rho$ 的作用可得近似公式如下:

$$\begin{aligned} Den(\cos(\theta_{(x,y)}^{t \rightarrow t+2})_\rho) &= \sqrt{\frac{(\rho'_x)^2}{(\rho'_x + \rho'_y)^2} (\rho'_x)^2 (v'_x)^2 + \frac{(\rho'_y + \Delta\rho)^2}{(\rho'_x + \rho'_y)^2} (\rho'_y)^2 (v'_y)^2} \sqrt{(v'_x)^2 + (v'_y)^2} \\ &= \sqrt{\frac{(\rho'_x)^2}{(\rho'_x + \rho'_y)^2} \cdot [(\rho'_x)^2 (v'_x)^2 + (\rho'_y)^2 (v'_y)^2] + \left(\frac{2\rho'_x \Delta\rho}{(\rho'_x + \rho'_y)^2} + \frac{(\Delta\rho)^2}{(\rho'_x + \rho'_y)^2}\right) \cdot (\rho'_y)^2 (v'_y)^2} \sqrt{(v'_x)^2 + (v'_y)^2} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} Den(\cos(\theta_{(x,y)}^{t \rightarrow t+2})_\rho) &= \sqrt{\frac{(\rho'_x)^2}{(\rho'_x + \rho'_y)^2} (\rho'_x)^2 (v'_x)^2 + \frac{(\rho'_y)^2}{(\rho'_x + \rho'_y)^2} (\rho'_y)^2 (v'_y)^2} \sqrt{(v'_x)^2 + (v'_y)^2} \\ &\approx \frac{\sqrt{(\rho'_x)^2 + (\rho'_y)^2}}{(\rho'_x + \rho'_y)} \sqrt{(\rho'_x)^2 (v'_x)^2 + (\rho'_y)^2 (v'_y)^2} \sqrt{(v'_x)^2 + (v'_y)^2} \end{aligned} \quad (12)$$

结合式(11)与式(12),可以得到式(6)的近似表示为:

$$\begin{aligned}\cos(\theta_{(x,y)}^{t \rightarrow t+2}) &= \frac{\left(\frac{\rho'_x}{\rho'_x + \rho'_y}\right)}{\frac{\sqrt{(\rho'_x)^2 + (\rho'_y)^2}}{(\rho'_x + \rho'_y)}} \cdot \frac{[(\rho'_x)^2 (v'_x)^2 + (\rho'_y)^2 (v'_y)^2]}{\sqrt{((\rho'_x)^2 v'_x)^2 + ((\rho'_y)^2 v'_y)^2} \sqrt{(v'_x)^2 + (v'_y)^2}} \\ &= \frac{\rho'_x}{\sqrt{(\rho'_x)^2 + (\rho'_y)^2}} \cdot \frac{[(\rho'_x)^2 (v'_x)^2 + (\rho'_y)^2 (v'_y)^2]}{\sqrt{((\rho'_x)^2 v'_x)^2 + ((\rho'_y)^2 v'_y)^2} \sqrt{(v'_x)^2 + (v'_y)^2}}\end{aligned}\quad (13)$$

最后,一步角度变化 $\theta_{(x,y)}^{t \rightarrow t+1}$ 的余弦值 $\cos(\theta_{(x,y)}^{t \rightarrow t+1})$ 可以表示如下:

$$\cos(\theta_{(x,y)}^{t \rightarrow t+1}) \approx \frac{[\rho'_x (v'_x)^2 + \rho'_y (v'_y)^2]}{\sqrt{(\rho'_x)^2 (v'_x)^2 + (\rho'_y)^2 (v'_y)^2} \sqrt{(v'_x)^2 + (v'_y)^2}} \quad (14)$$

结合式(13),可以得到一步运动相位余弦值 $\cos(\theta_{(x,y)}^{t \rightarrow t+1})$ 和两步运动相位余弦值 $\cos(\theta_{(x,y)}^{t \rightarrow t+2})$ 之间的时序演化关系,如下所示:

$$\cos(\theta_{(x,y)}^{t \rightarrow t+2}) \approx \frac{\rho'_x}{\sqrt{(\rho'_x)^2 + (\rho'_y)^2}} \cdot \cos(\theta_{(x,y)}^{t \rightarrow t+1}) + \xi_t \quad (15)$$

同理,考虑 k 步运动角度和一步运动角度的关系:

$$\cos(\theta_{(x,y)}^{t \rightarrow t+k}) \approx \left(\frac{\rho'_x}{\sqrt{(\rho'_x)^2 + (\rho'_y)^2}}\right)^{k-1} \cdot \cos(\theta_{(x,y)}^{t \rightarrow t+k-1}) + \xi_{t+k} \quad (16)$$

$$p_{\text{forge}}(f_s) = \frac{2\delta_c^2}{\left|1 + \left(\frac{\rho'_x}{\sqrt{(\rho'_x)^2 + (\rho'_y)^2}}\right)^{2(k-1)} - 2 \frac{(\rho'_x)^{k-1}}{\left(\frac{\rho'_x}{\sqrt{(\rho'_x)^2 + (\rho'_y)^2}\right)^{k-1}} \cos(2\pi f_s)\right|} \quad (18)$$

通过对比观察式(17)和式(18)可知:随着角度余弦序列的演化系数减小,式(18)中的分母项会相应增大,从而整个序列的频谱峰值会明显降低。

2.3 运动角度频域连续性衰减直观展示

2.2节通过理论推导证明视频经过 k 帧删除后,运动目标的运动角度会出现频域连续性衰减现象。为了结论更直观,本节将展示时域连续性衰减与频域连续性衰减的区别。

为此,本节将文献[14]中所提取的运动角度序列投影到频域,得到运动角度序列的频谱图。具体来说,假设文献[14]中所构造角度序列记为 $\mathbf{M} = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)$,随后以 $[0, 0.5]$ 为频谱区间,对序列 \mathbf{M} 进行 128 归一化傅里叶变换。

$$p(f_i) = \frac{\sum_{t=0}^{n-1} \theta_t \cdot e^{-j2\pi f_i t}}{\text{Max}(p(f_i))} \quad (19)$$

运动角度频域连续性衰减如图 3 所示。其中,红色曲线是真实视频的角度序列频谱图,绿色曲线是伪造视频角度序列频谱图。

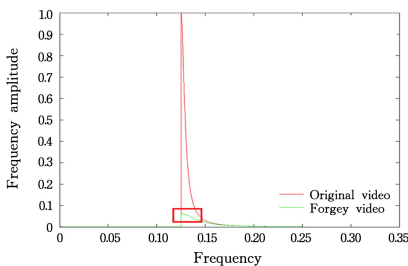


图 3 运动角度频域连续性衰减示意图(电子版为彩图)

Fig. 3 Schematic diagram of continuity-attenuation of motion orientation in frequency domain

对比式(15)和式(16)可知,帧删除会造成运动相位余弦值的演化模式发生改变:角度余弦值将以 $\left(\frac{\rho'_x}{\sqrt{(\rho'_x)^2 + (\rho'_y)^2}}\right)^k$ 作为传递参数演化。进一步推导运动角度的频域连续性衰减痕迹。根据式(2),假设角度余弦序列的时间间隔为 T_s ,则其频谱为:

$$p(f_s) = \frac{2\delta_c^2}{\left|1 + \frac{(\rho'_x)^2}{(\rho'_x)^2 + (\rho'_y)^2} - 2 \frac{\rho'_x}{\sqrt{(\rho'_x)^2 + (\rho'_y)^2}} \cos(2\pi f_s)\right|} \quad (17)$$

当删除 k 帧后, $\cos(\theta_{(x,y)}^{t \rightarrow t+1})$ 和 $\cos(\theta_{(x,y)}^{t \rightarrow t+2})$ 之间的演化过程变为 $\cos(\theta_{(x,y)}^{t \rightarrow t+1})$ 和 $\cos(\theta_{(x,y)}^{t \rightarrow t+k})$ 之间的演化。此时根据式(2)可得频谱如下:

$$p_{\text{forge}}(f_s) = \frac{2\delta_c^2}{\left|1 + \left(\frac{\rho'_x}{\sqrt{(\rho'_x)^2 + (\rho'_y)^2}}\right)^{2(k-1)} - 2 \frac{(\rho'_x)^{k-1}}{\left(\frac{\rho'_x}{\sqrt{(\rho'_x)^2 + (\rho'_y)^2}\right)^{k-1}} \cos(2\pi f_s)\right|} \quad (18)$$

为方便对比时域与频域连续性衰减的不同,图 4 给出了角度序列的时域直方图。其中,红色曲线是真实视频角度序列直方图,绿色曲线是伪造视频角度序列直方图。

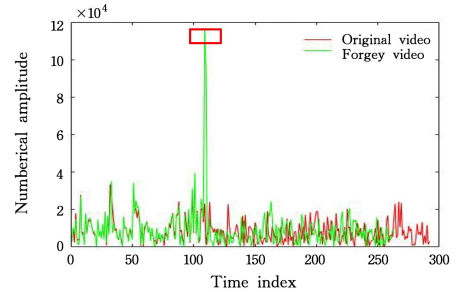


图 4 运动角度时域连续性衰减示意图(电子版为彩图)

Fig. 4 Schematic diagram of continuity-attenuation of motion orientation in time domain

如图 4 所示,运动角度的时域连续性衰减表现为直方图中异常增大的峰值点(已用红框标注)。与之不同,如图 3 所示,运动角度的频域连续性衰减表现为频谱中频谱峰值的骤然减小。

根据式(17)和式(18)的分析可知,帧删除导致运动角度序列的时序演化系数变小,进一步导致其频谱峰值的骤然减小。进一步考虑,根据 2.1 节,频域一阶马尔可夫模型主要用来表征序列整体的演化过程。如果序列的演化过程平稳,其频谱会出现明显峰值。然而,帧删除篡改导致运动角度的整体演化过程遭到破坏,进而导致其频谱出现紊乱。由此,通过实验证明了 2.2 节所推导运动角度的频域连续性衰减痕迹的正确性。

3 本文算法

第2章对运动角度的频域连续性衰减痕迹进行了推导,本章据此提出新的检测方法。通过观察图3可知,如果直接将运动角度序列转换至频域,会损失全部时域信息。考虑到这一问题,本章引入时频分析技术,提出了一种新的帧删除检测方法。算法分为4个步骤:运动角度序列提取、演化参数估计、波动特征时频谱提取、阈值判决。

步骤1 运动角度序列提取

运动角度序列提取工作在文献[14]中已详细介绍,这里不加赘述。值得注意的是,文献[14]中所构造角度特征是高维矩阵序列,记为 $\{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n\}$ 。

步骤2 演化参数估计

根据式(7),想要求得运动角度序列的频谱,需要对运动角度序列的演化参数进行合理估计。然而,由于所构造序列是由高维矩阵构成的,同一像素在时域的运动角度存在空间错位,因此,这里使用奇异值分解方法来对高维矩阵序列进行演化参数估计。

假设 t 时刻和 $t+1$ 时刻所得运动角度矩阵为 θ_t 和 θ_{t+1} ,首先分别对 $\cos(\theta_t)$ 和 $\cos(\theta_{t+1})$ 进行如下奇异值分解:

$$\cos(\theta_t) = \sum_{i=1}^n \delta_i^t \cdot \mathbf{u}_i^t (\mathbf{v}_i^t)^T \quad (20)$$

$$\cos(\theta_{t+1}) = \sum_{i=1}^n \delta_i^{t+1} \cdot ((\mathbf{u}')_i^t) ((\mathbf{v}')_i^t)^T \quad (21)$$

其中, δ_i^t 和 δ_i^{t+1} 分别表示 $\cos(\theta_t)$ 和 $\cos(\theta_{t+1})$ 的奇异值; \mathbf{u}_i^t 和 \mathbf{v}_i^t 分别表示 $\cos(\theta_t)$ 的行特征向量和列特征向量; $(\mathbf{u}')_i^t$ 和 $(\mathbf{v}')_i^t$ 分别表示 $\cos(\theta_{t+1})$ 的行特征向量和列特征向量。随后使用如下内积公式来估计 $\cos(\theta_t)$ 和 $\cos(\theta_{t+1})$ 的演化参数,记为 $\hat{\rho}_{\cos}^t$:

$$\hat{\rho}_{\cos}^t = \frac{\sum_{i=1}^n \delta_i^t \delta_i^{t+1}}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^n (\delta_i^t)^2\right)} \cdot \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n (\delta_i^{t+1})^2\right)}} \quad (22)$$

由此得到由演化参数构成的时序序列,记为 ρ_{\cos} 。

基于奇异值分解估计演化参数的合理性在于:奇异值分解可以将两个矩阵 $\cos(\theta_t)$ 和 $\cos(\theta_{t+1})$ 投影到特征空间。奇异值表征了矩阵在特征空间中的大小,行特征向量和列特征向量则描述矩阵在特征空间的坐标位置。因此,通过将两个矩阵分别投影到特征空间,可以在一定程度上实现同一像素运动角度在不同时刻的对齐。

步骤3 时频谱提取

在得到演化参数序列 ρ_{\cos} 后,继续提取序列的时频谱。本文选用Willimas变换来提取时频谱,如式(13)所示:

$$CWD_z(t, \omega) = \frac{1}{4\pi^{\frac{3}{2}}} \iint \frac{1}{\sqrt{\tau^2/\delta}} \exp\left[-\frac{(t-u)^2}{4\tau^2/\delta}\right] z\left(t + \frac{\tau}{2}\right) z^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-j\omega\tau} du d\tau \quad (23)$$

其中, τ 是时域参数, v 是频域参数, δ 是尺度参数。事实上,时频分析技术可以进一步分为线性时频分析方法和非线性时频分析方法。关于本文选用非线性时频分析方法的原因,将在4.3节说明。

步骤4 阈值判决

根据频域连续性衰减痕迹,伪造视频的运动角度序列频

谱的频谱峰值会产生明显衰减。据此设计一个检测函数来对输入视频进行检测。具体来说,固定时频谱 $CWD_z(t, \omega)$ 中参数 t ,对每一时刻所对应的频谱值进行相加,并取倒数如下:

$$CWD_z(t) = \frac{1}{\sum_{\omega=1}^n \text{abs}(CWD_z(t, \omega))} \quad (24)$$

由于 $CWD_z(t, \omega)$ 的频谱峰值衰减,则其倒数 $CWD(t)$ 会明显增大。设置宽度为 h 的滑动窗口在时域进行滑动,并计算窗口中各点的量化平均值:

$$\bar{s} = \frac{\sum_{t=1}^{h-1} CWD_z(t) + \sum_{t=h+1}^{2h+1} CWD_z(t)}{2h} \quad (25)$$

如果平均值 \bar{s} 小于中心点的分数,则视为帧删除点。

4 实验分析

4.1 数据集及实验设置

1)测试环境: Intel^(R) Core^(TM) i7-4700 CPU, 2.6 GHz 主频, 8GB 内存, Windows 7 系统, 算法实现平台为 MATLAB 2012b。

2)测试集: 本文选用由华南理工大学多媒体信息安全检测和智能处理研究中心创建的VFDD数据集^[20]。数据集中所有的视频片段是由不同型号的手持设备所记录,视频类型较为完备,适用于取证算法的有效性测试。本文选取其中324个视频作为测试集。

3)评估指标: 本文采用检测率(TPR)和虚警率(FAR)作为算法性能评估标准。

$$TPR =$$

$$\frac{\sum \text{CorrDetectForgedvideos}}{\sum \text{CorrDetectForgedvideos} + \sum \text{WroDetectForgedvideos}} \quad (26)$$

$$FAR =$$

$$\frac{\sum \text{WroDetectOriginalvideos}}{\sum \text{WroDetectOriginalvideos} + \sum \text{CorrDetectForgedvideos}} \quad (27)$$

其中, $\sum \text{CorrDetectForgedvideos}$ 是正确检测出的伪造视频数; $\sum \text{WroDetectForgedvideos}$ 是没有检测出的伪造视频数; $\sum \text{WroDetectOriginalvideos}$ 是将原始视频检测为伪造视频数。

值得说明的是,经过实验,滑动窗口长度从3到9对算法性能没有明显影响。因此本文将滑动窗口长度设置为5。

4.2 运动角度连续性衰减痕迹的时频谱效果

本节将直观地展示运动角度序列时频谱,以说明其有效性。真实视频与伪造视频的运动角度时频谱如图5和图6所示,伪造视频中所出现的频谱衰减由红框标出。

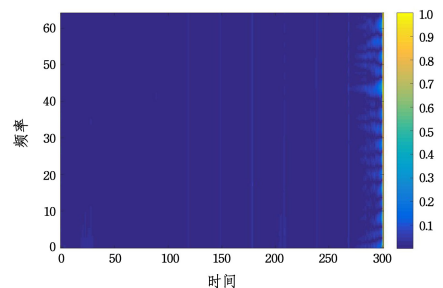


图5 真实视频检测结果

Fig. 5 Detection results of real videos

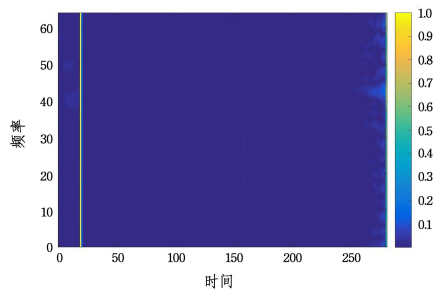


图6 伪造视频检测结果

Fig. 6 Detection results of faked videos

从图5和图6可以观察到:篡改视频的运动角度时频特征谱中出现明显能量衰减谱。正如之前所分析,由于原始视频的运动角度变化较为平稳,因此其频域连续性衰减痕迹并不明显,说明此时视频的时域演化过程没有被破坏,时序系统运行机制良好。相反,对于篡改视频,帧删除导致时序系统的运行机制出现异常,进而导致运动角度

出现明显连续性衰减。

通过对检测结果的视觉展示,验证了本文算法可以捕捉到帧删除所导致的连续性衰减现象,进而实现帧删除检测。同时与2.3节运动角度序列的频谱图相比较可知,由于时频分析技术可以保留部分时域信息,因此利用时频分析可以有效定位篡改位置。

4.3 不同时频变换下的频域马尔可夫连续性衰减痕迹

时频变换方法可以分为线性时频变换和非线性时频变换。为了评估不同时频变换方法对于连续性衰减痕迹的影响,本节设计了一系列实验来说明。

为此,首先选用两种线性时频变换方法,即短时傅里叶变换(STFT)和小波变换(WT),来提取时频。线性时频变换方法所选取窗函数的支撑集长度会影响时频谱图的时频分辨率,对此,本节进行消融实验。固定窗函数为汉明窗,并且在不同窗函数尺度(分别设置为45,55,37,27,19,9)下使用STFT方法提取时频谱。结果如图7所示。

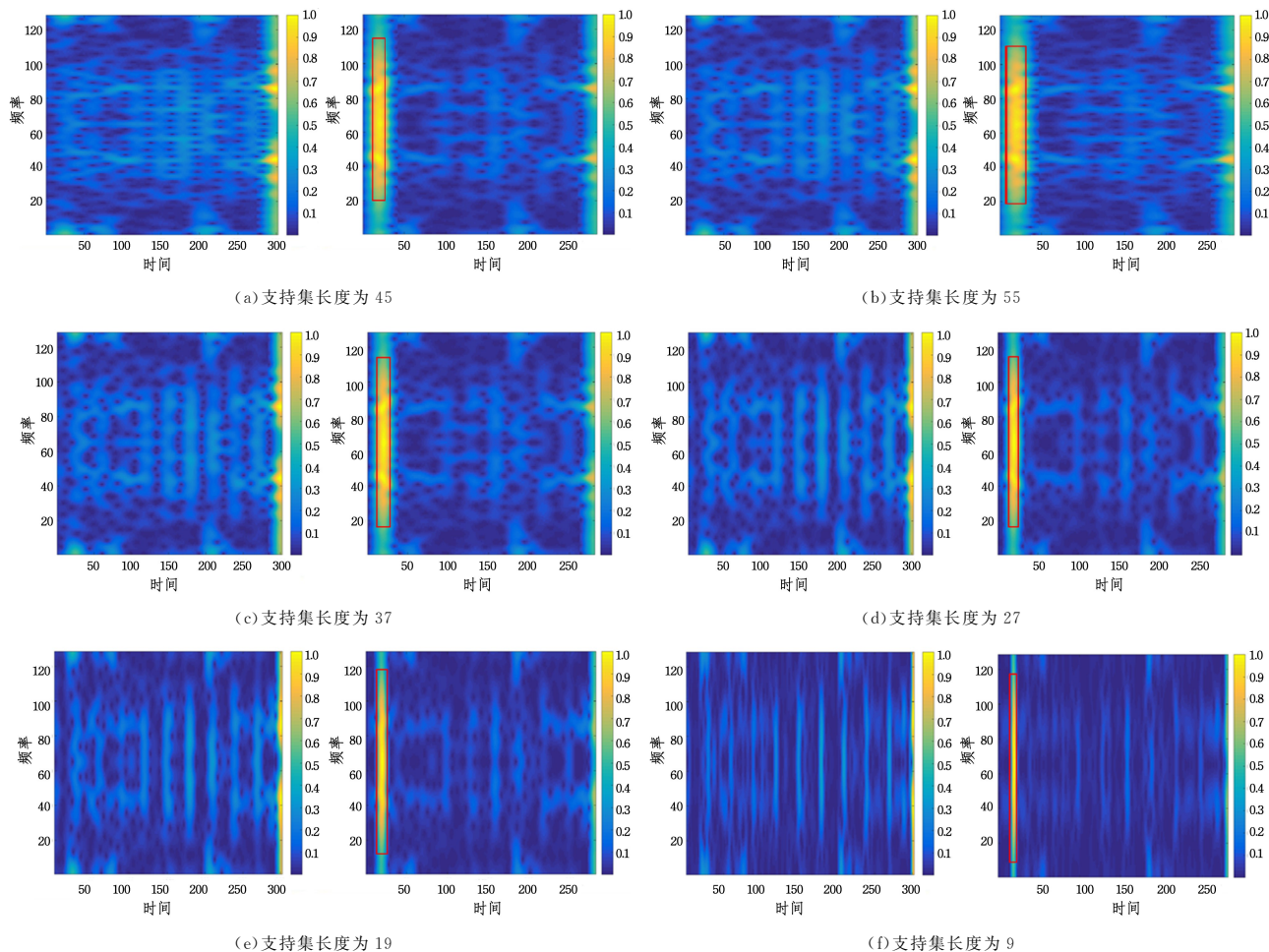


图7 不同窗函数尺度下的STFT时频谱

Fig. 7 STFT spectrograms under different window function scales

对比观察支撑集长度为55,37,19的时频谱效果可知:随着支撑集长度的缩短,频域连续性衰减特征明显减弱。这是因为支撑集长度缩短使得时域采样点数量减少,由此投影到频域的能量也相应产生衰减。这一事实通过对比支撑集长度为45,27,9时的取证特征时频谱也可以证实。因此,核函数的支撑集长度对于连续性衰减痕迹的捕捉具有重要作用。如

果支撑集长度过短,可能导致频谱能量衰减不足,从而无法捕捉到衰减痕迹。

继续使用小波变换在不同支撑集尺度下提取时频谱,其中小波函数固定为Morlet小波,尺度参数与之前相同。结果如图8所示。

通过对比观察不同支撑集长度下小波变换时频谱可以

发现:随着支撑集长度减小,连续性衰减痕迹同样出现衰减现象。基于上述讨论可知:使用线性时频变换进行帧删除检测时,需要适当增大窗函数的支撑集长度,从而保证捕捉到连续性衰减痕迹。然而,窗函数支撑集的增大会导致时域分辨率降低,影响篡改位置的定位精度。综上可知,使用线性时频分

析方法会受到时频分辨率影响。时域分辨率较高时,可能会造成衰减痕迹减弱;而时域分辨率较低时,篡改位置的定位精度会相应降低。因此,使用线性时频分析方法提取特征时,需综合考虑检测性能与定位精度影响,选取合适的时频分辨率。

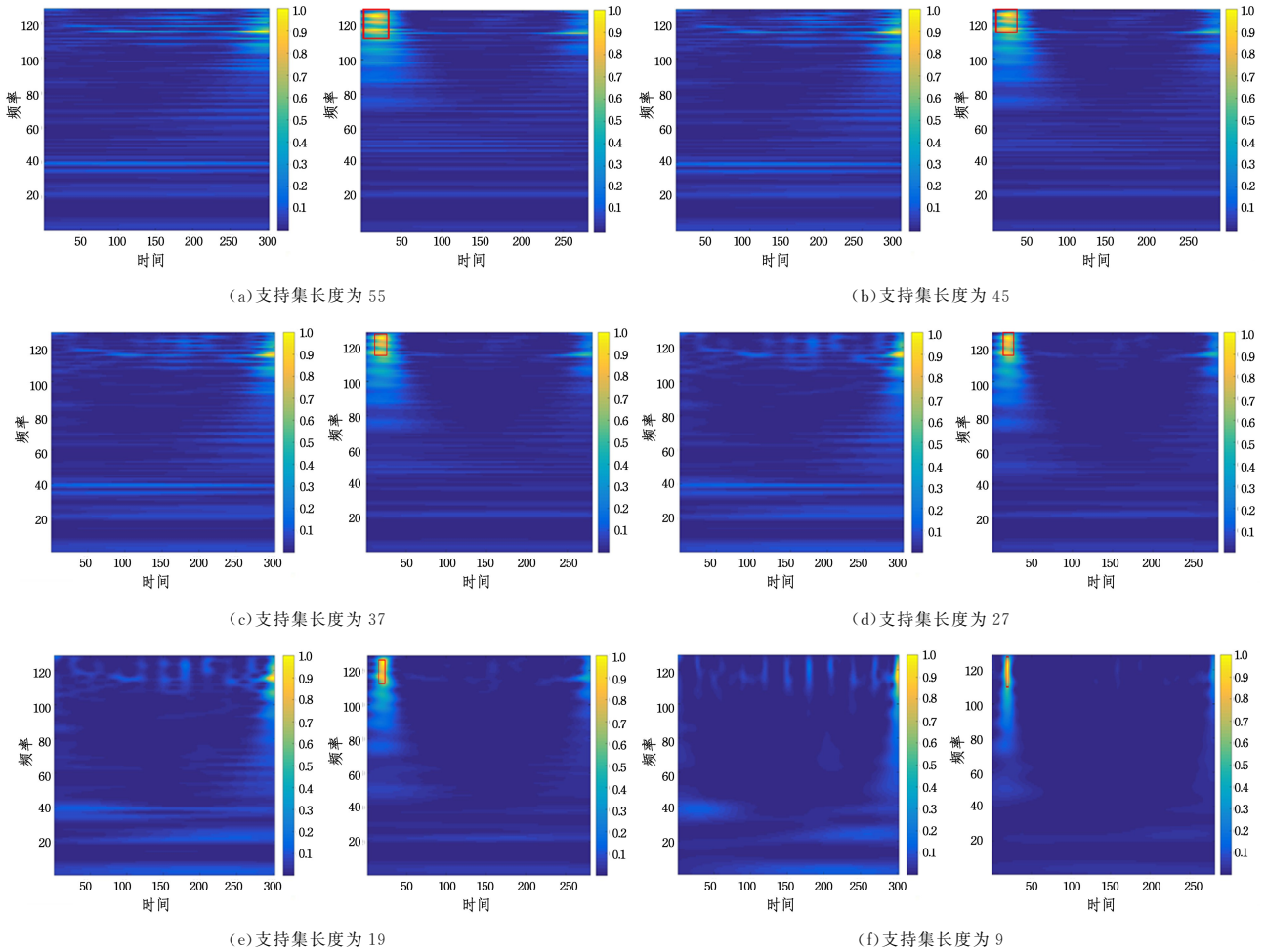


图 8 不同窗函数尺度下 WT 时频谱

Fig. 8 WT spectrograms under different window function scales

相较于线性时频分析,非线性时频分析方法具有较强的时频能量聚集性和较高的时频分辨率。因此,可以在有效捕捉连续性衰减痕迹的同时,保持较高的时域分辨率。然而,非线性时频分析存在交叉项问题。图 9 和图 10 给出经过 Wagner-Will 变换所提取时频谱,以说明交叉项问题。

通过观察图 10 可知,非线性方法同样可以捕捉到连续性衰减痕迹,表现为红框处的时频能量衰减,且时频分辨率较高。然而其时频谱中有较多干扰项(黄色框标定处),因此需要考虑抑制非线性时频分析中交叉项干扰项。为此,继续使用伪 Wagner-Will 分布来提取篡改痕迹时频谱,结果如图 11 和图 12 所示。

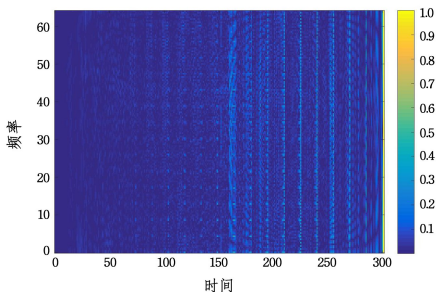


图 9 真实视频的 Wagner-Will 时频谱

Fig. 9 Wagner-Will spectrogram of real video

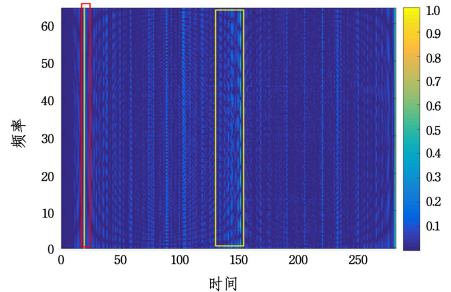


图 10 伪造视频的 Wagner-Will 时频谱(电子版为彩图)

Fig. 10 Wagner-Will spectrogram of faked video

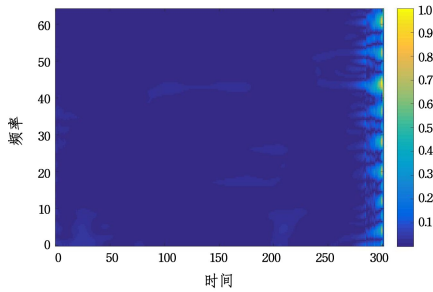


图 11 原始视频的伪 Wagner-Will 时频谱

Fig. 11 Pseudo-Wagner-Will spectrogram of real video

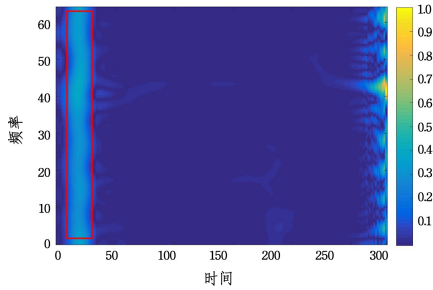


图 12 伪造视频的伪 Wagner-Will 时频谱

Fig. 12 Pseudo-Wagner-Will spectrogram of fake video

直观地对比观察图 10 和图 12 可以发现,伪 Wagner-will 分布消除了图 10 中出现的交叉项干扰,同时保留了帧删除篡改痕迹。但伪 Wagner-will 分布在频域计算时增加了频域滤波器,以滤除交叉项干扰,导致表征连续性衰减痕迹的时频能量特征有所减弱。由以上分析可知,使用非线性时频变换方法时,需要将频域滤波器设计为高频滤波器,尽可能去除交叉项的同时,保持取证特征的显著性。

Williams 变换是一种保持高度时频分辨率的非线性时频变换方法。其核函数设计为高频滤波器,用于去除干扰项的同时,保留目标特征的频域信息。Williams 变换的篡改痕迹时频谱如图 5 和图 6 所示。通过对比观察图 12 和图 6 可知,Williams 变换能够在去除干扰项的同时,保留明显的篡改痕迹特征。因此本文选择 Williams 分布作为提取时频谱的方法。

4.4 鲁棒性分析

本节通过实验说明频域连续性衰减痕迹相较于时域连续性衰减痕迹的优越性。为此,以数据集中“ball”视频为例,分别使用文献[14]和本文方法进行检测,图 13 和图 14 分别给出两种方法的检测结果。

如图 13 所示,红框标定处是由帧删除所引起的连续性衰减痕迹。蓝框标定处突然出现运动角度变化较大目标,其所引起的运动角度连续性衰减大于帧删除所引起的衰减痕迹,导致该峰值掩盖了篡改痕迹。

同时,通过观察图 14 可知,本文算法准确捕捉到了频域连续性衰减痕迹(红框标定处)。主要原因在于:在频域中,篡改痕迹的时域波动周期与视频内容连续性衰减的波动周期不同。通过将特征投影到频域,可以实现分离帧删除所引起的连续性衰减与不同视频内容所产生的连续性衰减。

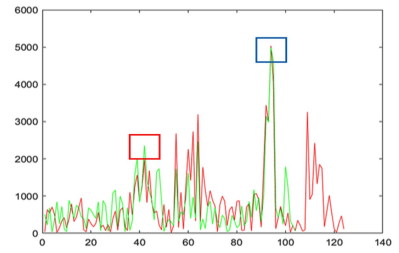


图 13 文献[14]方法检测结果(电子版为彩图)

Fig. 13 Detection results of reference [14]

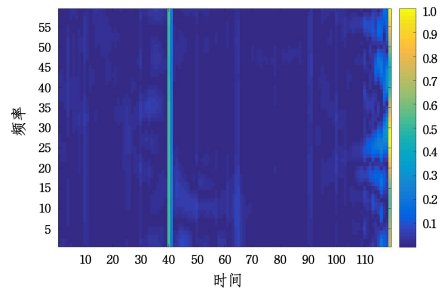


图 14 本文方法检测结果(电子版为彩图)

Fig. 14 Detection results of the proposed method

4.5 对比实验与分析

为了全面评估本文算法的性能,本节从检测性能和时间效率两个方面,将本文方法与流行算法(文献[14-17])进行对比。其中文献[14-15]是传统算法,文献[16-17]是基于深度学习的算法。首先,将本文算法与所有算法进行检测性能对比,以检测率和虚警率为评价指标。结果如表 1 所列。

表 1 检测性能对比

Table 1 Comparison results of detection performance

方法	检测率	虚警率
文献[14]	0.912	0.061
文献[15]	0.818	0.003
文献[16]	0.919	0.031
文献[17]	0.939	0.026
本文算法	0.947	0.018

从表 1 中可以直观看出,本文算法取得了最高的检测率,同时保持了较低的虚警率。具体来说,本文算法检测率达到 0.947,相对于传统算法(0.912,0.818)有较大提升;同时,相较于基于深度学习算法(0.919,0.939)也略有提升。尽管深度神经网络对于时域连续性衰减这种差异性具有较高的识别能力,然而正如 4.4 节所讨论,视频时域内容较为复杂,可能出现突然的运动变化导致视频的时域连续发生衰减,而导致神经网络也难以捕捉到帧删除痕迹。而本文通过频域分析对取证特征进行进一步表达,可以对取证特征予以更有效的表示,增强取证特征的连续性衰减捕捉能力,进一步提高算法的检测性能。

另一方面,从表中可以看出,本文虚警率达到 0.018,仅高于文献[15]的 0.003,然而本文算法检测率相较于文献[15]具有较大提升。原因可能在于,文献[15]算法所提取的模式噪声特征更适用于静态内容视频,而本文选取数据集基本上都包含动态内容。复杂的动态内容掩盖了模式噪声的连续

性衰减痕迹。因此综合考虑,本文算法仍优于文献[15]算法。

综上所述,相较于时域连续性衰减痕迹,频域连续性衰减痕迹对于视频内容的复杂性具有更强的适应能力,能够更好地捕捉帧删除篡改行为。

随后,以检测耗时为指标,将本文算法与其他两种传统算法(文献[14-15])进行计算效率的对比。由于所用数据集中视频长短不一,因此以数据集中“On Street1”视频为例,统计不同算法的检测耗时。对比结果如表2所列。

表2 计算效率对比结果

Table 2 Comparison results of computational efficiency

方法	耗时/ms
文献[14]	521
文献[15]	356
本文算法	634

通过对比结果可知,本文算法的计算效率较前两种算法有所不及。主要原因在于,在传统的时域连续性衰减特征提取工作之后,本文还利用时频分析方法提取频域连续性衰减特征,导致算法运行时间有所增加。考虑到本文算法在检测性能方面的提升,计算效率的增加是可以接受的。

5 视频帧删除检测技术的证据效力规范

本文提出的视频帧删除检测技术在司法取证中具有广泛的应用场景。然而,该技术效力存在的法律认可程度、检测结果的证据效力以及技术应用的合规性等问题仍需从法学角度进行系统性规范。因此,基于前述频域连续性衰减痕迹检测技术,应当从证据合法性、证据真实性以及证据关联性3方面进行法律规范,从而实现法律对技术的价值规范作用。

5.1 证据合法性:技术认证与法律标准的衔接

电子数据作为法定证据需满足合法性、真实性、关联性要求。要确保技术认证与法律标准的有效衔接,首先要解决的关键问题是技术认证的合法性问题。电子数据的合法性要求其生成、提取及鉴定过程符合法定程序与技术规范。本研究提出的频域连续性衰减痕迹检测技术,通过量化运动角度的频域演化异常,能够客观反映视频时序机制的破坏,但其司法效力需以技术合法性为前提。具体而言,一方面,本研究算法通过频域马尔可夫模型捕捉的连续性衰减痕迹,能够客观反映视频时序演化机制的异常,为电子数据鉴定的合法性提供支撑,因此建议将此技术纳入《法庭科学 电子数据恢复检验规程》(GB/T 29360-2023)的补充条款,明确频域特征分析作为视频篡改检测的标准化方法之一,以实现技术认证的合法合规。

另一方面,为更加有效建构法律标准和技术认证的衔接机制,还应当建立第三方技术认证机制,由司法鉴定机构等对电子数据中的算法鲁棒性、误检率、透明度等核心指标进行认证,确保其符合《司法鉴定程序通则》的技术可靠性要求。最后,还应当确保取证程序的合法合规,根据《刑事诉讼法》《关于办理刑事案件收集提取和审查判断电子数据若干问题的规定》等规定,视频检测技术的应用应当遵循原始数据固定、取证过程留痕、结论可验证等程序性要求,取证程序的合规性可有效防范“技术黑箱”的质疑,增强证据的司法公信力。

5.2 证据真实性:技术结论与事实认定的协同

证据真实性要求检测结论能够反映视频内容是否被篡改,本研究所提出的频域连续性衰减痕迹通过分离帧删除行为与视频内容干扰等方法,可以为确定视频真实性认定提供依据。事实上,在司法实践中,视频作为电子证据的采纳标准已经逐步确立并得以完善。本研究提出的频域连续性衰减痕迹检测技术,能够通过捕捉运动角度的频域异常,实现精准定位帧删除篡改行为。这一技术的实现能够为视频内容的完整性、真实性验证提供量化指标,还能够辅助司法机关对视频证据的真实性进行司法认定,实现技术结论与事实认定的协同。例如,在实践案例中,当检测到视频中某一区间的频谱峰值显著衰减,即可作为篡改行为的直接技术证据给予固定,这也同时符合《电子签名法》中关于电子数据完整性等有关规范的要求。此外,《刑事诉讼法》明确要求电子证据的提取需遵循技术规范,而本算法通过时频分析技术提取的演化参数序列与阈值判决结果,可以作为司法鉴定报告中的关键数据,有效增强证据的客观性和可采性。

5.3 证据关联性:技术结论与案件事实的逻辑联结

基于法律规范的确实要求,证据关联性聚焦于检测结果与待证事实之间的实质性联系。本研究所提出的频域检测技术能够通过精准定位视频中的篡改位置继而分析篡改意图,从而强化证据的证明力。事实上,视频帧删除检测结果作为电子数据的衍生数据,其证据效力需符合最高人民法院、最高人民检察院、公安部《关于办理刑事案件收集提取和审查判断电子数据若干问题的规定》以及最高人民法院《关于互联网法院审理案件若干问题的规定》等对电子数据关联性审查的基本原则。在技术核验方面,检测过程需全程记录并生成可追溯的时频谱图(见图5、图6),作为算法运行逻辑的关联性证明。在逻辑验证方面,则需要结合视频采集设备的元数据(如时间戳、编码参数)等与检测结果中的频域衰减特征(如式(7)、式(8)推导的频谱峰值变化),形成对关联性检验的闭合证据链。此外,为增强检测结果的证据效力,应推进专家辅助人制度,可以要求鉴定人员出庭说明频域马尔可夫模型的数学原理及阈值判决的合理性,以辅助裁判者增强对技术结论的辨别力。

结束语 本文针对基于时域连续性衰减痕迹的视频帧删除检测算法所存在的易受复杂内容干扰的问题,提出了一种基于频域运动角度连续性衰减痕迹的帧删除检测算法。为此,本文以运动角度为研究对象,首先引入一阶马尔可夫模型来描述帧间连续性,明确连续性含义;随后经过详细分析与推导,得到运动角度的频域马尔可夫连续性衰减痕迹,作为算法提出的理论线索;然后基于取证线索,提出一种基于时频分析技术的帧删除检测算法。大量实验结果表明,本文算法能够有效应对复杂视频内容引起的连续性衰减,实现检测性能的进一步提升。

然而,本文算法仍存在不足之处。实验结果表明,相较于时域算法,本文算法的计算复杂度较高,计算量需求较大。因此,未来的研究工作会将计算复杂度作为一个主要考虑因素,对运动角度提取、时频谱提取等工作做进一步优化,以降低计算复杂度。

视频帧删除检测技术的法律规范化,是技术理性与法律价值协同发展的必然要求,亦是数智时代刑事司法变革的重要命题。正如引言部分所述,在提出频域连续性衰减痕迹检测技术的过程中,本研究提出从证据合法性、证据真实性、证据关联性3个方面建构法律规制框架。该框架不仅可以为频域马尔可夫模型等算法的司法应用提供法治化保障,为数智时代电子证据规制的体系化完善奠定坚实基础,还能为频域分析技术的司法落地给予实践化的操作指南,形成从技术设计到法律规制的完整逻辑闭环,最终实现程序正义与技术正义的双重目标。

参 考 文 献

- [1] SINGH R D, AGGARWAL N. Video Content Authentication Techniques: A Comprehensive Survey[J]. *Multimedia Systems*, 2018, 2(24): 211-240.
- [2] WANG W, FARID H. Exposing Digital Forgeries in Video by Detecting Double Quantization[C]// *ACM Workshop Multimedia Security*. New York: ACM, 2009: 9-48.
- [3] SU Y, JING Z, JIE L. Exposing Digital Video Forgery by Detecting Motion-Compensated Edge Artifact[C]// *Computational Intelligence and Software Engineering*, 2010: 37-47.
- [4] VAZQUEZPADIN D, FONTANI M, BIANCHI T. Detection of video double encoding with GOP size estimation[C]// *IEEE International Workshop on Information Forensics and Security*, 2012: 151-156.
- [5] FENG C, XU Z, JIA S, et al. Motion-Adaptive Frame Deletion Detection for Digital Video Forensics[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2017, 27(12): 2543-2554.
- [6] SHANABLEH T. Detection of Frame Deletion for Digital Video Forensics[J]. *Digital Investigation*, 2013, 4(10): 350-360.
- [7] ZHANG Z, HOU J, LI Z. Efficient Video Frame Insertion and Deletion Detection Based on Inconsistency of Correlations between Local Binary Pattern Coded Frames[J]. *Security and Communication Networks*, 2017, 8(2): 311-320.
- [8] ZHAO Y, PANG T, LIANG X, et al. Frame Deletion Detection for Static-Background Video Based on Multi-scale Mutual Information[C]// *Cloud Computing and Security: Third International Conference*, 2017: 371-384.
- [9] ZHANG Z Z, HOU J J, LI Z H, et al. Video frame-interpolation and frame-deletion forgery detection based on MSSIM quotient consistency[J]. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2015, 38(4): 84-88.
- [10] LIU Y, HUANG T. Exposing Video Inter-Frame Forgery by Zernike Opponent Chromaticity Moments and Coarseness Analysis[J]. *Multimedia Systems*, 2017, 2(23): 223-238.
- [11] CONOTTER V, OBRIEN J F, FARID H. Exposing Digital Forgeries in Ballistic Motion[J]. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2012, 7(1): 283-296.
- [12] CHAO J, JIANG X, SUN T. A Novel Video Inter-frame Forgery Model Detection Scheme Based on Optical Flow Consistency[C]// *International Workshop on Digital Watermarking*. Berlin: Springer, 2012: 267-281.
- [13] WANG W, JIANG X, WANG S. Identifying Video Forgery Process Using Optical Flow[C]// *International Workshop on Digital Watermarking*. Berlin: Springer, 2014: 244-257.
- [14] LI S, HUO H T. Frame Deletion Detection Based on Optical Flow Orientation Variation[J]. *IEEE Access*, 2021, 99: 37196-37209.
- [15] BAO Q, WANG Y, HUA H, et al. An anti-forensics video forgery detection method based on noise transfer matrix analysis[J]. *Sensors*, 2024, 24(16): 5341.
- [16] GOWDA R, PAWAR D. Deep learning-based forgery identification and localization in videos[J]. *Signal, Image and Video Processing*, 2023, 17: 2185-2192.
- [17] LI S, HUO H T. Continuity-Attenuation Captured Network for Frame Deletion Detection[J]. *Signal, Image and Video Process*, 2024, 18(4): 3285-3297.
- [18] FENG C, WU D, WU T, et al. An MSDCNN-LSTM Framework for Video Frame Deletion Forensics[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2024, 83: 72745-72764.
- [19] YI D H. Time Series Analysis: Forecasting and Control [J]. *Application of Statistics and Management*, 2000(3): 51.
- [20] HU Y, SALMAN A. Construction and testing of video tamper detection database[J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2017, 45: 57-64.



WANG Kangqing, born in 1989, Ph. D, lecturer, is a member of CCF (No. Z3557M). His main research interests include information network security and digital law.



XIA Likuan, born in 1991, Ph.D, lecturer. His main research interests include criminal trial and criminal evidence.

(责任编辑:柯颖)