

针对视频运动补偿帧率提升篡改的主动混噪取证算法

李 然^{*①②} 梅腊腊^① 邬长安^① 朱秀昌^②

^①(信阳师范学院计算机与信息技术学院 信阳 464000)

^②(南京邮电大学通信与信息工程学院 南京 210003)

摘 要: 运动补偿帧率提升(MC-FRUC)是常见的视频时域篡改手段。现有方法依靠被动分析视频统计特征发现 MC-FRUC 篡改,然而,视频统计特性的非平稳性影响了取证性能的稳定性。该文提出一种主动混噪取证算法,通过预先混入统计特性已知的高斯白噪声,提高 MC-FRUC 取证的准确度。首先,利用伪随机序列生成高斯白噪声,加入原始视频序列。接着,由小波系数的绝对中位差预测各视频帧中混入高斯噪声的标准差。最后,检测高斯噪声标准差的时域变化周期性,通过硬阈值判决,自动甄别 MC-FRUC 篡改。实验结果表明,针对不同的 MC-FRUC 伪造方法,提出算法均表现出良好的取证性能,尤其是当采用去噪、压缩等操作后处理视频后,提出算法仍能确保较高的检测准确度。

关键词: 运动补偿帧率提升; 主动取证; 高斯噪声; 绝对中位差; 周期性检测

中图分类号: TN919.8

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2018)03-0713-08

DOI: 10.11999/JEIT170502

Active Noised-mixed Forensics Algorithm for Tampering of Video Motion-compensated Frame Rate Up-conversion

LI Ran^{①②} MEI Lala^① WU Chang'an^① ZHU Xiuchang^②

^①(School of Computer and Information Technology, Xinyang Normal University, Xinyang 464000, China)

^②(College of Telecommunications and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: Motion-Compensated Frame Rate Up-Conversion (MC-FRUC) is one of the common temporal-domain tampering methods of video. The existing methods recognize MC-FRUC tampering by passively analyzing statistical characteristics of video; however, the non-stationarity in statistics of video affects the stability of forensics. This paper proposes an active noise-mixed forensics algorithm. First, white Gaussian noises are produced using a pseudorandom sequence, and these noises are added into the original video sequence. Second, based on the median absolute deviation of wavelet coefficients, the standard deviation of mixed Gaussian noises in each video frame is estimated. Last, the periodicity of standard deviation varying in time domain is detected, and MC-FRUC tampering with a hard-thresholding operation is automatically identified. Experimental results indicate that the proposed algorithm presents better performance of forensics for various MC-FRUC methods, and can still ensure high detection accuracy especially after videos are denoised or compressed.

Key words: Motion-Compensated Frame Rate Up-Conversion (MC-FRUC); Active forensics; Gaussian noise; Median absolute deviation; Periodicity detection

1 引言

视频数据中丰富的时间冗余信息易于被伪造者利用,使得数字视频面临着篡改伪造的威胁。在各种时域篡改方式中,视频帧率提升(Frame Rate

Up-Conversion, FRUC)^[1]尤为常见,例如,在视频点播网站中,伪造者为了获得高清标签吸引点击量,常利用帧率提升手段将低码率视频篡改为高码率视频,这种不良行为损害了视频服务商与广大网民的经济利益^[2]。因此,我们急需可甄别视频帧率提升篡改的数字取证方法,保证对视频数据来源的知情权。

帧复制是最简单的视频帧率提升手段,因其简单易用,它被一些商业视频编辑软件(例如,ImTOO, VideoEdit Magic 等)采用。针对帧复制篡改,通过

收稿日期: 2017-05-24; 改回日期: 2017-11-10; 网络出版: 2017-12-11

*通信作者: 李然 liran358@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(61501393)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (61501393)

分析相邻帧间相似性,就可发现篡改痕迹,例如, Bian 等人^[3]利用结构相似性(Structural SIMilarity, SSIM)指标^[4]量化帧间相似性; Yang 等人^[5]提取各帧特征,以特征间欧式距离量化帧间相似性。这些相似性指标随时间变化的周期性模式,就是证明帧复制篡改的有力证据。帧复制制作的高帧率视频往往会出现闪烁、卡顿现象,这是由忽略帧间运动造成的,因此,更为高级的,运动补偿帧率提升(Motion-Compensated FRUC, MC-FRUC)手段^[6],受到伪造者的青睐。MC-FRUC 沿着运动轨迹实施像素插值,可产生流畅、清晰的视频流,具有较高的人眼舒适度,是目前提升视频帧率的主流手段。然而,这些高质量的伪造视频不存在周期性的帧间相似性,使得检测帧复制篡改的取证算法失效^[3]。Bestagini 等人^[7]率先尝试检测 MC-FRUC 篡改,他们首先将可疑视频下采样,利用帧平均算子重新提升视频帧率,获得检测视频,再逐帧计算检测视频与可疑视频帧的均方误差,最后通过分析均方误差的周期性获得伪造证据。Bestagini 的算法取得了一定效果,但该算法必须已知提升倍数,然而,该条件在大多数情况下是无法满足的。Yao 等人^[8]通过检测边缘特征完整性判断是否存在 MC-FRUC 伪造,尤其是采用自适应阈值判决,实现了自动批量检测。Xia 等人^[9]、Ding 等人^[10]也发掘出一些统计特征与插帧操作的联系,提升了检测 MC-FRUC 篡改的准确度。由于 MC-FRUC 可采用不同的技术手段^[11-13]实现,上述 MC-FRUC 检测算法在遭遇到复杂的高精度篡改手法(例如,多假设运动估计^[13]、后期纹理渲染^[14])时,往往捉襟见肘,检测准确度将大幅度衰退,尤其是伪造者再施以压缩、去噪等后处理后,该情况会进一步恶化。因此,确保 MC-FRUC 取证算法性能的稳定,是目前的一大挑战。

在 MC-FRUC 内插视频帧的同时,设备噪声的统计特性会被改变,因此,通过检测设备噪声的时域变化规律,可判断视频是否经过 MC-FRUC 伪造^[15]。然而,不同的 MC-FRUC 手段及其外部干扰将加剧噪声统计特性的非平稳性,十分影响取证性能的稳定。噪声被动取证的主要缺陷在于设备噪声的高斯分布概率建模。原始视频序列不仅存在来自采集设备的热噪声,也有来自外部的其他类型噪声,因此,高斯分布建模实际中并无法完全反映噪声的统计规律,这给检测高斯噪声方差的被动取证算法带来了不稳定。针对这一缺陷,本文采用伪随机序列生成高斯白噪声,注入原始视频序列,通过设定噪声方差,依赖成熟的高斯噪声检测技术,加强取证性能的稳定。由于噪声具有随机性,只要

适当控制噪声方差,就可隐蔽噪声,不影响原始视频序列的主观视觉质量。实验结果表明,提出的主动混噪取证算法可有效鉴别由不同 MC-FRUC 方法伪造的视频序列,且经过去噪、压缩攻击后,仍确保较高的检测准确度。

2 背景知识

2.1 运动补偿帧率提升

运动补偿帧率提升(MC-FRUC)是一种视频后处理技术,通过预测帧间运动估计实现中间帧内插,以提高视频帧率。MC-FRUC 主要由运动估计、运动向量平滑、运动向量映射和运动补偿内插 4 部分组成,其中前 3 部分是利用参考帧 f_{t-1} 与 f_{t+1} 生成当前帧 f_t 的运动向量场 V_t ,而最后部分是根据 V_t 插值形成当前帧估计 \hat{f}_t 。首先,运动估计用于生成 f_{t-1} 与 f_{t+1} 间的运动向量场 V_{t-1} ,接着,运动向量平滑纠正 V_{t-1} 中存在的运动异常,获得光顺的运动向量场 \bar{V}_{t-1} ,再通过运动向量映射将 \bar{V}_{t-1} 映射为当前帧运动向量场 V_t ,最后,根据 V_t 可找到当前帧中任一像素在参考帧中的匹配像素,内插出当前帧如式(1):

$$\hat{f}_t(i, j) = \frac{1}{2} \left[f_{t-1} \left(i + V_{t-1}^{(i,j)}, j + V_{t-1}^{(i,j)} \right) + f_{t+1} \left(i - V_{t-1}^{(i,j)}, j - V_{t-1}^{(i,j)} \right) \right] \quad (1)$$

其中, (i, j) 代表像素位置, $(V_{t-1}^{(i,j)}, V_{t-1}^{(i,j)})$ 代表 V_{t-1} 在像素位置 (i, j) 处的运动向量。MC-FRUC 内插精度主要依靠于 V_t 的准确度,因此,采用不同运动估计策略,将会生成不同视觉质量的内插帧。

2.2 高斯噪声方差估计

图像中混入的噪声水平采用方差度量。本文采用基于小波变换的绝对中位差(Median Absolute Deviation, MAD)算法^[16]估计一幅含噪声图像 x 的高斯噪声标准差如式(2):

$$\hat{\sigma} = \frac{1}{0.6745} \times \text{MAD}(\mathbf{y}_s) \quad (2)$$

其中, \mathbf{y}_s 代表 x 的一级细尺度小波系数。MAD 算子定义如式(3):

$$\text{MAD}(\mathbf{y}_s) = \text{Median} \left(\left| \mathbf{y}_s - \text{Median}(\mathbf{y}_s) \right| \right) \quad (3)$$

其中, $\text{Median}(\cdot)$ 代表取输入向量的中值。快速小波变换确保了 MAD 法的高执行速率,使之适宜用于批量估算视频帧的高斯噪声方差。

3 主动混噪取证算法

本文提出的主动混噪取证流程如图 1 所示。首先,对原始视频作混噪预处理,即利用伪随机序列生成标准差为 σ 的高斯噪声,加入视频序列的每个像素中;接着,处理后的视频将遭受 MC-FRUC 篡

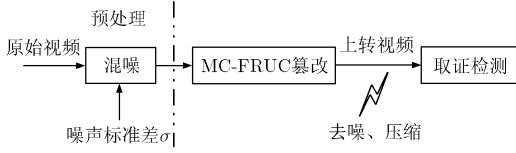


图1 主动混噪取证流程

改，生成上转视频，去噪、压缩等攻击也可能被实施；最后，分析可疑视频的高斯噪声分布，鉴别是否存在MC-FRUC篡改。以下具体介绍提出算法的核心：混噪、取证与检测。

3.1 混噪与取证

设原始视频序列由 L 个尺寸为 $M \times N$ 的视频帧组成。利用伪随机序列可生成标准差为 σ 的 0 均值高斯噪声，加入原始视频序列的每一像素如式(4)：

$$f_t(i, j) = o_t(i, j) + n_t(i, j) \quad (4)$$

其中， $o_t(i, j)$ 与 $f_t(i, j)$ 分别代表第 t 帧原始帧和含噪帧位于位置 (i, j) 处的像素值， $n_t(i, j)$ 代表混入的高斯噪声值。当原始视频序列遭遇MC-FRUC篡改，两个原始帧 f_{t-1} 与 f_{t+1} 必会根据式(1)内插出当前帧 \hat{f}_t 。结合式(4)，式(1)可推导为

$$\hat{f}_t(i, j) = \hat{o}_t(i, j) + \hat{n}_t(i, j) \quad (5)$$

其中

$$\begin{aligned} \hat{o}_t(i, j) = & \frac{1}{2} \left[o_{t-1} \left(i + V_{t,1}^{(i,j)}, j + V_{t,2}^{(i,j)} \right) \right. \\ & \left. + o_{t+1} \left(i - V_{t,1}^{(i,j)}, j - V_{t,2}^{(i,j)} \right) \right] \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \hat{n}_t(i, j) = & \frac{1}{2} \left[n_{t-1} \left(i + V_{t,1}^{(i,j)}, j + V_{t,2}^{(i,j)} \right) \right. \\ & \left. + n_{t+1} \left(i - V_{t,1}^{(i,j)}, j - V_{t,2}^{(i,j)} \right) \right] \end{aligned} \quad (7)$$

由式(7)可知，内插帧噪声项 \hat{n}_t 由第 $t-1$ 帧噪声项 n_{t-1} 与第 $t+1$ 帧噪声项 n_{t+1} 沿运动轨迹加权求和而得。由于噪声项各分量相互独立，那么，对式(7)两端同时取方差可得

$$\begin{aligned} \sigma_t^2 = D[\hat{n}_t(i, j)] = & \frac{1}{4} \left\{ D \left[n_{t-1} \left(i + V_{t,1}^{(i,j)}, j + V_{t,2}^{(i,j)} \right) \right] \right. \\ & \left. + D \left[n_{t+1} \left(i - V_{t,1}^{(i,j)}, j - V_{t,2}^{(i,j)} \right) \right] \right\} \end{aligned} \quad (8)$$

由于 f_{t-1} 与 f_{t+1} 内各像素点预先混入了标准差为 σ 的 0 均值高斯噪声，那么可知

$$\begin{aligned} D \left[n_{t-1} \left(i + V_{t,1}^{(i,j)}, j + V_{t,2}^{(i,j)} \right) \right] \\ = D \left[n_{t+1} \left(i - V_{t,1}^{(i,j)}, j - V_{t,2}^{(i,j)} \right) \right] = \sigma^2 \end{aligned} \quad (9)$$

将式(9)代入式(8)得

$$\sigma_t^2 = \frac{1}{2} \sigma^2 \quad (10)$$

即内插帧 \hat{f}_t 的方差 σ_t^2 是混入噪声方差 σ^2 的一半。MC-FRUC 篡改将周期性地插入内插帧，因此，伪

造视频的噪声标准差会呈现周期性突变，如图2所示(未伪造视频是30 fps原始视频，伪造视频采用文献[12]提出方法将15 fps原始视频上转至30 fps)，对Foreman视频预先混入标准差为5的高斯噪声，采用MAD法估计未伪造与伪造视频的噪声标准差，可看出，未伪造视频的噪声标准差曲线平稳缓慢地变化，而伪造视频的噪声标准差曲线快速地呈周期性变化。由此可知，噪声标准差曲线的周期性可作为甄别MC-FRUC篡改的有力证据。

3.2 周期性检测

通过频谱分析检测噪声标准差曲线的周期性，就可实现MC-FRUC篡改的自动识别。利用快速傅里叶变换计算噪声标准差曲线 σ_t 的频谱 F_k 如式(11)：

$$F_k = \text{FFT}(\sigma_t), k = 0, 1, \dots, L \quad (11)$$

其中， $\text{FFT}(\cdot)$ 代表快速傅里叶变换算子， L 为噪声标准曲线的长度。采用高通滤波器抑制频谱 F_k 的直流、低频成分，如式(12)：

$$F_k^h = \text{HFP}(F_k, d) = \begin{cases} F_k, & d < k \leq L - d \\ 0, & 0 \leq k \leq d, L - d < k \leq L \end{cases} \quad (12)$$

其中， $\text{HFP}(\cdot)$ 代表高通滤波算子， F_k^h 代表高频成分， d 为截止频率。为了突出频谱尖峰，对 F_k^h 作幅度增强处理，如式(13)：

$$S_k = \sum_{l=d+1}^{L-d} |F_k^h - F_l^h|, k = d+1, d+2, \dots, L-d \quad (13)$$

如图3所示，经式(12)、式(13)处理后，未伪造视频的噪声标准差频谱出现了密集的小尖峰，而伪造视频的噪声标准差频谱中心出现大尖峰，其幅值远高于周围尖峰。由此可知，大尖峰的出现证明噪声标准差频谱具有周期性。然而，由图3(b)可看出，大尖峰周围仍有一些小尖峰，为了滤除这些小尖峰干扰，可按下述步骤处理 S_k ：

(1)初始化：将频谱 S_k 的极大值保留，其余成分置 0 后，赋予 $P_k^{(0)}$ ，设置迭代变量 $n = 1$ ；

(2)计算 $P_k^{(n-1)}$ 的均值 $E^{(n-1)}$ ；

(3)利用 $E^{(n-1)}$ 对 $P_k^{(n-1)}$ 作硬阈值收缩如式(14)：

$$P_k^{(n)} = \begin{cases} P_k^{(n-1)}, & P_k^{(n-1)} \geq 0.8E^{(n-1)} \\ 0, & P_k^{(n-1)} < 0.8E^{(n-1)} \end{cases} \quad (14)$$

(4)若满足

$$\{P_k^{(n)} | k = 0, 1, \dots, L\} \cap \{P_k^{(n-1)} | k = 0, 1, \dots, L\} = \emptyset \quad (15)$$

则停止迭代，输出 $P_k = P_k^{(n)}$ ，否则令 $n = n + 1$ 转到(2)继续执行。

如图4所示，当执行上述步骤后，未伪造视频保留若干小尖峰，而伪造视频仅保留了单个大尖峰，

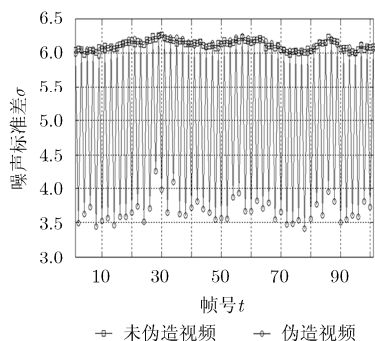
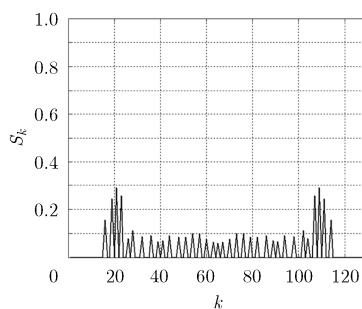
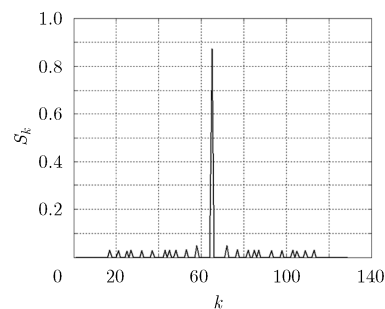


图2 未伪造与伪造Foreman视频序列的噪声标准差曲线



(a)未伪造视频



(b)伪造视频

图3 未伪造、伪造视频的噪声标准差频谱

那么,若检测可疑视频出现单个异常大尖峰,就可证明该视频存在 MC-FRUC 篡改操作。为了实现自动检测,必须量化图 4 所示的两种频谱状态,因此,设计伪造水平值如式(16):

$$FV = \frac{\text{MAX}\{P_k | k = 0, 1, \dots, L\}}{J \times E^{(0)}} \quad (16)$$

其中, $\text{MAX}\{\cdot\}$ 代表取输入集合的最大值, J 代表 P_k 的尖峰个数, $E^{(0)}$ 代表 $P_k^{(0)}$ 的均值。由式(16)可知,对于伪造视频的噪声标准差频谱, P_k 峰值异常大,而尖峰个数极少,因此,其 FV 值较大,相反,对于未伪造视频的噪声标准差频谱, P_k 峰值较小,而尖峰个数较多,因此,其 FV 值较小。那么, FV 值就可作为判断是否存在 MC-FRUC 篡改的量化指标,通过设定适当的阈值,就可实现自动检测,即

$$\text{MC-FRUC} = \begin{cases} \text{on}, & FV \geq \text{Thr} \\ \text{off}, & FV < \text{Thr} \end{cases} \quad (17)$$

其中, Thr 为判决阈值, on 代表存在 MC-FRUC 操作, off 代表不存在 MC-FRUC 操作。

4 实验结果及分析

采用 23 组 CIF 格式、30 fps 的测试视频序列作为基础,构造评估提出算法性能所需的阴例集(Negative Set, NS)和阳例集(Positive Set, PS)。对于阴例集,直接对 23 组视频序列混入标准差为 0, 3,

5, 7, 9, 11 的高斯白噪声而形成,共 138 组测试视频序列;对于阳例集,先对阴例集的视频序列下转换为 15 fps,再分别采用文献[11-13]提出的 MC-FRUC 方法将它们篡改为 30 fps,形成 552 组测试视频序列。首先,测试提出算法检测视频所得的 FV 值分布,确定未伪造、伪造视频的 FV 值取值范围;接着,利用本文算法检测阴例集和阳例集,评估本文算法性能。最后,测试本文算法抵抗去噪、压缩攻击的能力。性能指标分别采用假阳率(False Positive Rate, FPR)、假阴率(False Negative Rate, FNR),分别定义为

$$FPR = R_{NS} / N_{NS} \quad (18)$$

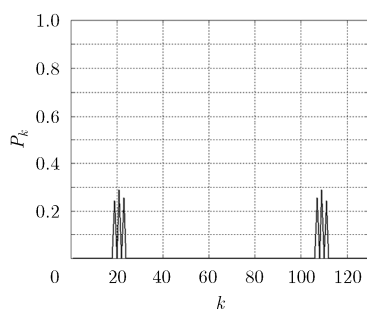
$$FNR = R_{PS} / N_{PS} \quad (19)$$

其中, R_{NS} , R_{PS} 分别为阴例集、阳例集的检测错误个数, N_{NS} , N_{PS} 分别为阴例集、阳例集容量。另外,定义检测准确度(Detection Accuracy, DA)为

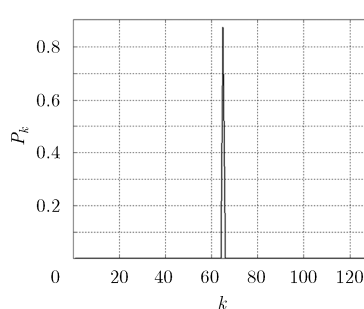
$$DA = 1 - FNR - FPR \quad (20)$$

4.1 算法性能分析

图 5 显示了阴例集与阳例集在不同噪声标准差取值下的平均 FV 值。由图 5 可看出,阴例集与阳例集的 FV 值差别较大,因此,可通过硬阈值判决实现 MC-FRUC 的甄别。然而,当噪声标准差 σ 为 0,即不对原始视频混入高斯噪声,可看到在该情况



(a)未伪造视频



(b)伪造视频

图 4 滤除小尖峰干扰后,未伪造、伪造视频的噪声标准差频谱

下，阳例集的 FV 值取值较小，这就给误判提供了可能，因此，主动混噪有利于拉大阴例集与阳例集的 FV 值差距，降低硬阈值判决发生误判的可能性。图 6 显示了压缩、去噪攻击对阳例集的 FV 值影响，可看出，经过压缩、去噪攻击后，FV 值降低，尤其对于去噪攻击，下降幅度较大。主动混入的噪声方差越低，FV 值越小，而在噪声方差较大时，FV 值仍能保证较高值，因此，为了抵抗压缩、去噪攻击，应当适当加大主动混入的噪声方差。

图 7 显示了在不同视频长度、空间分辨率及 GOP 长度下阴例集和阳例集的平均 FV 值。如图 7(a) 所示，在视频长度自 20 以步长 10 递增至 100 的过程中，阴例集的平均 FV 值逐步递减，而阳例集的平均 FV 值逐步递增，造成该结果的原因在于，视频长度越长，获得的噪声方差数据越多，若不存在伪造痕迹，噪声方差的非周期变化现象更明显，FV 值越低，然而，一旦存在伪造痕迹，周期变化越明显，FV 值越高。由于在视频长度过短时，阴例集和阳例集的平均 FV 值差距较小，因此，视频长度较短将对取证性能造成不利影响。如图 7(b) 所示，在视频帧中央区域开窗，计算尺寸 40×40 至 200×200 窗口内像素的噪声方差，分析 FV 值变化，可发现，随着窗口尺寸增大，阴例集的平均 FV 值逐步递减的同时，阳例集的平均 FV 值逐步递增，且窗口尺寸越小，阳例集与阴例集的平均 FV 值差距越小，这说明在空间分辨

率较高时，噪声方差的周期性变化更明显，因此，为了确保高检测准确度，应保证较高的空间分辨率。通过周期性插入 I 帧对视频进行压缩，分析 GOP 长度对 FV 值的影响如图 7(c) 所示，可看出，I 帧的周期性出现对 FV 值的影响不大，这是由于主动混噪引入的噪声方差不会因视频质量变化而发生估计误差。尽管对视频取不同的参数，阴例集与阳例集的平均 FV 值曲线仍未重叠，因此，通过固定阈值判决，就能以较高的准确度判别 MC-FRUC 篡改。

4.2 篡改检测结果

阈值 Thr 作为 FV 值的临界判决值，用以决定可疑视频是否存在 MC-FRUC 篡改，它是确保高检测准确度的重要参数。为了设置合适的阈值 Thr，选取与测试视频序列不同的 23 组 CIF 格式、30 fps 的训练视频序列，组成与测试集合相同容量的训练集合，其中阴例集和阳例集仍采用上述方法进行构造。图 8 分别显示了训练集合中阴例集和阳例集的 FV 值概率分布，可看出，大部分阴例集样本的 FV 值均小于 3，而阳例集样本的 FV 值分布较均匀，约有 90% 以上的阳例集样本 FV 取值大于 3。因此，较合适的阈值 Thr 应取值低于 3。基于上述分析结果，我们在 $[0.05, 3.00]$ 范围内以 0.05 为步长，选取若干个候选阈值，通过交叉验证的方式在其中选择最合适的阈值。首先，分别将训练集合的阴例集和阳例集随机划分为容量相同、互不重叠的两个子集，其中一个子集

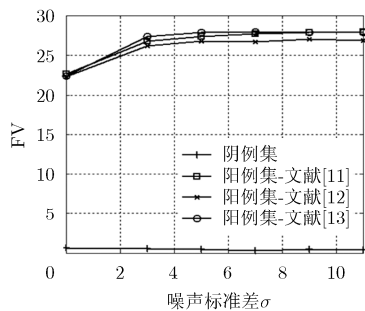


图 5 不同噪声标准差取值下，阴例集与阳例集的平均 FV 值分布

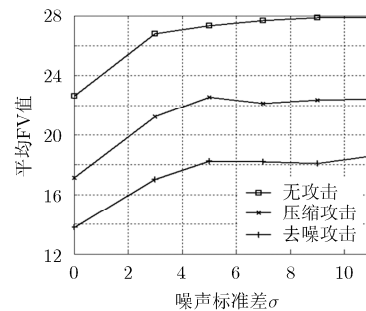
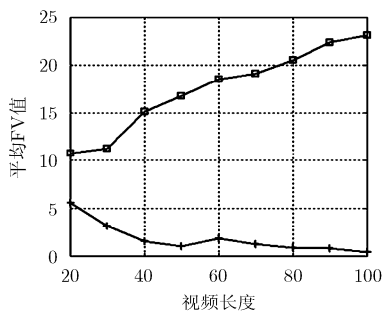
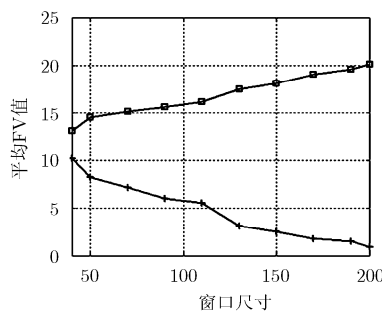


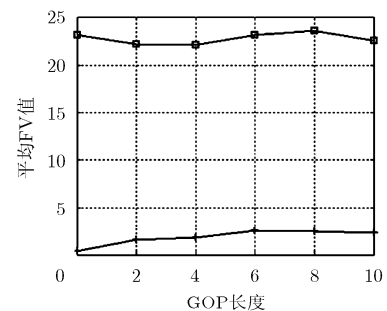
图 6 压缩、去噪攻击对 FV 值的影响



(a) 视频长度



(b) 空间分辨率



(c) GOP 长度

图 7 视频长度、空间分辨率及 GOP 长度对 FV 值的影响

用于训练，一个子集用于测试。对于训练子集，采用所有的候选阈值检测所有样本，选取平均检测准确度最高的阈值。对于测试子集，采用训练子集输出的最佳阈值，计算测试子集的平均检测准确度。将上述交叉验证方案执行 10 次，获得的阈值变化与平均检测准确度变化曲线如图 9 所示，可看出，在每次交叉验证中，选择出的最佳阈值均可确保测试子集的平均检测准确度在 0.92 以上，且当阈值 Thr 为 2.4 时，平均检测准确度达到最大。基于该交叉验证结果可知，设定阈值 Thr 为 2.4 较合适。

表 1 显示了检测由不同伪造方法生成视频序列的平均检测准确度。由表 1 可看出，当不对可疑视频作后处理攻击时，在任意噪声标准差 σ 下，平均检测准确度均达到 100%，这说明检测高斯噪声是有效鉴别 MC-FRUC 篡改的手段。当对阳例集中测试视频实施压缩攻击后，在不混噪情况下，检测发生了错误，例如，对于文献[11]伪造方法，FNR 值为

0.17，检测准确度 DA 为 0.917，然而，当实施了主动混噪后，平均检测准确度又重新回升为 100%，这说明主动混噪可抵御压缩攻击对检测带来的不良影响。当实施去噪攻击后，由于高斯噪声被有效抑制，这给以检测噪声标准差为核心的提出算法造成了一定影响。在不混噪情况下，FNR 值最高达到了 0.3，平均检测准确度仅有 0.85。当混入噪声后，平均检测准确度逐渐升高，这说明主动混噪可在一定程度上有效抵御去噪攻击。

采用文献[11-13]提出的 MC-FRUC 算法直接将阴例集中 30 fps 的 CIF 格式测试视频序列上采样为 60 fps，形成由 552 组直接上采样视频序列组成的阳例集。采用本文算法检测阳例集，对于不同伪造方法，其在不同噪声水平下阳例集的检测错误个数 R_{ps} 和假阴率 FNR 值如表 2 所示。对于无攻击情形下，当不主动混噪(即 $\sigma = 0$)时，出现了若干检测错误，例如，检测文献[13]伪造的视频，出现 3 个检测错误，

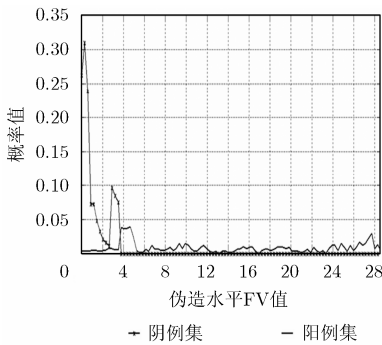


图 8 训练视频序列集中阴例集和阳例集的 FV 值分布

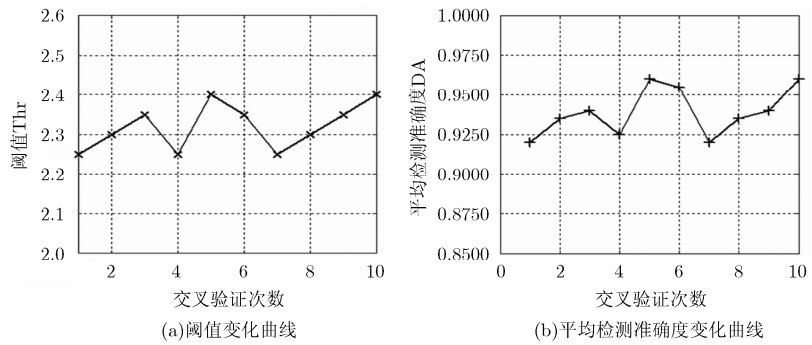


图 9 交叉验证结果

表 1 针对不同伪造方法的平均检测准确度

伪造方法	噪声标准差 σ											
	$\sigma = 0$		$\sigma = 3$		$\sigma = 5$		$\sigma = 7$		$\sigma = 9$		$\sigma = 11$	
	FNR	DA	FNR	DA	FNR	DA	FNR	DA	FNR	DA	FNR	DA
无攻击												
文献[11]	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00
文献[12]	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00
文献[13]	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00
压缩攻击												
文献[11]	0.17	0.915	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00
文献[12]	0.13	0.935	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00
文献[13]	0.22	0.890	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00
去噪攻击												
文献[11]	0.30	0.850	0.13	0.935	0.22	0.890	0.13	0.935	0.22	0.890	0.22	0.89
文献[12]	0.17	0.915	0.13	0.935	0.13	0.935	0.09	0.955	0.09	0.955	0.22	0.89
文献[13]	0.13	0.935	0.04	0.980	0.00	1.000	0.00	1.000	0.00	1.000	0.00	1.00

表 2 直接上采样视频组成的阳例集的检测错误个数 R_{PS} 和 FNR 值

伪造方法	噪声标准差 σ											
	$\sigma = 0$		$\sigma = 3$		$\sigma = 5$		$\sigma = 7$		$\sigma = 9$		$\sigma = 11$	
	R_{PS}	FNR	R_{PS}	FNR	R_{PS}	FNR	R_{PS}	FNR	R_{PS}	FNR	R_{PS}	FNR
无攻击												
文献[11]	1	0.04	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00
文献[12]	2	0.09	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00
文献[13]	3	0.13	1	0.04	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00
压缩攻击												
文献[11]	5	0.22	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00
文献[12]	4	0.17	1	0.04	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00
文献[13]	5	0.22	2	0.09	1	0.04	0	0.00	0	0.00	0	0.00
去噪攻击												
文献[11]	7	0.30	3	0.13	4	0.17	3	0.17	2	0.09	2	0.09
文献[12]	4	0.17	4	0.17	3	0.13	2	0.09	2	0.09	2	0.09
文献[13]	4	0.17	3	0.13	2	0.09	1	0.04	0	0.00	0	0.00

然而，由表 1 所示的非直接上采样视频检测结果，并未出现检测错误。出现上述情况的原因是，直接上采样视频帧间的时间间隔小，在伪造发生时，引入的篡改痕迹少，这增加了取证难度。当采取本文提出的主动混噪方案后，检测错误明显减少，随着 σ 增长至 5，检测错误降低为 0，这说明本文的主动混噪方案更适用于基于直接上采样的伪造视频序列。当发生压缩攻击时，不混噪将导致检测错误增加，而主动混噪后，检测错误明显降低。对于去噪攻击，无论混噪与否，均出现一定检测错误，但是，主动混噪情形下的检测错误数低于不混噪情形。综上所述，本文算法对直接上采样视频仍有较好的检测效果。

5 结束语

本文提出一种可鉴别 MC-FRUC 篡改的主动混噪取证算法。MC-FRUC 在内插视频帧时将沿运动轨迹实施像素值平均运算，这对高斯噪声统计特性造成一定影响，那么，通过量化噪声统计变化，就可揭露 MC-FRUC 的存在。提出算法采取主动取证思路，首先利用伪随机序列产生高斯白噪声，并混入原始视频序列，接着，利用基于 MAD 法估计可疑视频中各帧的噪声标准差，最后，通过检测噪声标准差随时间变化的周期性，获得伪造水平 FV 值，利用硬阈值判决自动识别是否存在 MC-FRUC 篡改。实验结果表明，未伪造视频的 FV 值远低于伪造视频，设定判决阈值为 2.4，在由 138 组视频组成的阴例集与由 532 组视频组成的阳例集上，本文算

法表现出良好的检测性能。当不对测试视频作后处理攻击时，平均检测准确度达到 100%，而针对于去噪、压缩攻击，主动混噪更能保持算法准确度的稳定性。

参 考 文 献

- [1] TSAI T H, SHI A T, and HUANG K T. Accurate frame rate up-conversion for advanced visual quality[J]. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 2016, 62(2): 426-435. doi: 10.1109/TBC.2016.2550764.
- [2] BIAN S, LUO W, and HUANG J. Exposing fake bit rate videos and estimating original bit rates[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2014, 24(12): 2144-2154. doi: 10.1109/TCSVT.2014.2334031.
- [3] BIAN S, LUO W, and HUANG J. Detecting video frame-rate up-conversion based on periodic properties of inter-frame similarity[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2014, 72(1): 437-451. doi: 10.1007/s11042-013-1364-5.
- [4] WANG Z, 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.
- [5] YANG J, HUANG T, and SU L. Using similarity analysis to detect frame duplication forgery in videos[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2016, 75(4): 1793-1811. doi: 10.1007/s11042-014-2374-7.
- [6] CHOI D, SONG W, CHOI H, et al. MAP-based motion refinement algorithm for block-based motion-compensated frame interpolation[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2015, 26(10): 1789-1804. doi:

- 10.1109/TCSVT.2015.2473275.
- [7] BESTAGINI P, BATTALIA S, MILANI S, *et al.* Detection of temporal interpolation in video sequences[C]. 2013 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, Vancouver, BC, Canada, 2013: 3033-3037. doi: 10.1109/ICASSP.2013.6638215
- [8] YAO Y, YANG G, SUN X, *et al.* Detecting video frame-rate up-conversion based on periodic properties of edge-intensity[J]. *Journal of Information Security & Applications*, 2016, 26(3): 8399-8421. doi: 10.1007/S11042-016-3468-1.
- [9] XIA M, YANG G, LI L, *et al.* Detecting video frame rate up-conversion based on frame-level analysis of average texture variation[J]. *Multimedia Tools & Applications*, 2017, 76(6): 8399-8421. doi: 10.1007/S11042-016-3468-1.
- [10] DING X, YANG G, LI R, *et al.* Identification of motion-compensated frame rate up-conversion based on residual signal[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2017, pp(99): 1-1. doi: 10.1109/TCSVT.2017.2676162.
- [11] DE H G, BIEZEN P W A C, HUIJGEN H, *et al.* True-motion estimation with 3-D recursive search block matching[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 1993, 3(5): 368-379. doi: 10.1109/76.246088.
- [12] YOO D G, KANG S J, and KIM Y H. Direction-select motion estimation for motion-compensated frame rate up-conversion[J]. *Journal of Display Technology*, 2013, 9(10): 840-850. doi: 10.1109/JDT.2013.2263374.
- [13] LIU H, XIONG R, ZHAO D, *et al.* Multiple hypotheses bayesian frame rate up-conversion by adaptive fusion of motion-compensated interpolations[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2012, 22(8): 1188-1198. doi: 10.1109/TCSVT.2012.2197081.
- [14] JEONG S G, LEE C, and KIM C S. Motion-compensated frame interpolation based on multihypothesis motion estimation and texture optimization[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2013, 22(11): 4497-4509. doi: 10.1109/TIP.2013.2274731.
- [15] LI R, LIU Z, ZHANG Y, *et al.* Noise-level estimation based detection of motion-compensated frame interpolation in video sequences[J]. *Multimedia Tools & Applications*, 2017, 76(10): 1-26. doi: 10.1007/s11042-016-4268-3.
- [16] LEIGH A, WONG A, CLAUSI D A, *et al.* Comprehensive analysis on the effects of noise estimation strategies on image noise artifact suppression performance[C]. 2011 IEEE International Symposium on Multimedia, Washington, DC, USA, 2011: 97-104.
- 李 然: 男, 1988 年生, 讲师, 硕士生导师, 研究方向为视频与图像处理、多媒体安全等.
- 梅腊腊: 女, 1992 年生, 硕士生, 研究方向为多媒体安全.
- 邬长安: 男, 1959 年生, 教授, 研究方向为视频与图像处理.
- 朱秀昌: 男, 1948 年生, 博士生导师, 研究方向为视频与图像处理、多媒体通信等.