

基于自适应奇异值调制的抗转码 视频隐写算法

管萌萌^{1,2}, 曹 纭^{1,2}, 张怡暄^{1,2}, 赵险峰^{1,2}

¹中国科学院信息工程研究所 信息安全国家重点实验室 北京 中国 100093

²中国科学院大学 网络空间安全学院 北京 中国 100093

摘要 近年来,随着网络和多媒体处理技术的飞速发展,互联网视频用户数量呈爆炸性增长之势,目前视频流量已占网络总流量的一半以上,这为以视频为载体的隐蔽通信提供了很好的应用背景。但是另一方面,几乎所有的视频网站都会对上传视频进行转码处理,转码后载体视频的码率、图像组 GOP(Group of Pictures)结构、量化参数 QP(Quantization Parameters)等关键压缩参数都会受到无法预知的影响,这极大地限制了当前绝大多数基于压缩域嵌入的视频隐写算法的应用。要利用视频网站对应的有损转码信道进行隐蔽通信,关键在于设计能抵抗转码攻击的高鲁棒性,并具有足够安全性的隐写方法。针对这一问题,本文提出了一种面向小波变换域,结合奇异值分解 SVD(Singular Value Decomposition)和量化索引调制 QIM(Quantization Index Modulation)的自适应鲁棒隐写方法。该方法基于目标网站的转码特性仿真实现本地编码器,在编码的过程中完成嵌入。嵌入在视频帧亮度分量的 DWT(Discrete Wavelet Transform)域进行,通过采用自适应量化步长 QIM 的方法对分块最大奇异值进行调制达到嵌入消息的目的。另外,提出一种间隔修正的嵌入策略,很好地抑制了嵌入引起的视频闪烁效应。实验结果表明,提出方法提升了含密载体视频经过不同程度的转码后的秘密消息生存率,同时很好地保持了视觉质量和压缩效率。

关键词 信息隐藏; 视频隐写; 鲁棒; 自适应嵌入

中图分类号 TN919.82 DOI号 10.19363/J.cnki.cn10-1380/tn.2018.11.04

A Transcoding-resistant Video Steganographic Algorithm based on Adaptive Singular Value Modification

GUAN Mengmeng^{1,2}, CAO Yun^{1,2}, ZHANG Yixuan^{1,2}, ZHAO Xianfeng^{1,2}

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

² School of Cyber Security, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China

Abstract Recent years have witnessed the exploding number of Internet video users as the rapid development of network and multimedia processing technologies. At present, video traffic has accounted for more than half of the total network traffic, which provides a good cover for video-based covert communication. On the other hand, almost all video websites will transcode the uploaded video. The key compression parameters such as the bit rate of the carrier video, the GOP (Group of Pictures) structure, and the quantization parameter QP (Quantization Parameters) will be transcoded. Unpredictably, this greatly limits the current majority of video steganography applications based on compressed domain embedding. To use the lossy transcoding channel corresponding to the video website for covert communication, the key is to design a steganographic method that is robust against transcoding attacks and has sufficient security. For this problem, this paper proposes an adaptive robust steganography method for wavelet transform domain combined with SVD (Singular Value Decomposition) and QIM (Quantization Index Modulation). The process is embedded in the DWT (Discrete Wavelet Transform) field of the video frame, and the maximum singular value of the block is modulated by the method of adaptive quantization step size QIM to achieve the purpose of embedding the message. In addition, an interval-embedded embedding strategy is proposed to suppress the video flicker effect caused by embedding. The experimental results show that the proposed method improves the confidential message survival rate of the video with the fixed carrier after different degrees of transcoding, and better maintains the visual quality and compression efficiency.

Key words information hiding; video steganography; robust; adaptive embedding

通讯作者: 曹纭, 副研究员, Email: caoyun@iie.ac.cn.

本课题得到中国科学院信息工程研究所基础前沿项目(No.Y7Z0371102), 国家自然科学基金(No.61802393, No.61872356), 国家重点研发计划(No.2016YFB0801003, No.2016QY15Z2500, No.2017YFC0822704)资助。

收稿日期: 2018-08-15; 修改日期: 2018-10-11; 定稿日期: 2018-10-09

1 引言

随着互联网和数字多媒体处理技术的飞速发展, 图像、音视频等多媒体内容已经成为人们沟通交流的重要媒介。但与此同时, 对传输信息的攻击和截获也变得更为容易, 一旦用户的重要信息被监听或破坏, 将会带来不可估量的损失。为实现更高安全级别的隐蔽通信, 不能完全依赖于传统加密技术, 在特定的环境下可以诉诸信息隐藏技术。信息隐藏是一门关于隐蔽通信的艺术和科学, 借助相关技术, 隐蔽通信的参与方可以将秘密信息以不可感知的方式隐藏在多媒体载体中, 并将载体以公开的方式进行发布或传输。相较于当前研究的较多的图像隐写, 视频隐写起步相对较晚, 但是由于视频载体具有负载能力大, 嵌入选择多的特点, 有着更好的应用价值。

目前绝大部分隐写算法主要针对理想无损信道进行设计, 而视频载体在网络上传输时, 可能会因为恶劣的物理环境而产生丢包, 丢帧; 另外, 也会由于被转码而使秘密信息无法被提取。本文主要研究能抵抗转码攻击的高安全性和高鲁棒性的隐写方法, 为对主流视频网站对应的转码信道进行利用做好技术支持。

近年来基于视频的抗转码信息隐藏方法主要是作为用于版权保护的水印算法被提出, 声称可用于隐写的方法极少。早期转码鲁棒性相关的研究主要集中在变换域, 如离散余弦变换(discrete cosine transform, DCT)^[1-3]离散小波变换(discrete wavelet transform, DWT)^[4,6]但此类算法的嵌入容量不高。随后又出现了修改图像统计量的方式进行信息隐藏的方法。视频本质上是连续采样的图像帧, 所以图像鲁棒性嵌入方法往往可以被视频方案的设计所借鉴, 视频载体需要重压缩或转码, 这对视频鲁棒性嵌入方法的设计提出了高得多的要求。

针对重压缩和转码, Alavianmehr 等^[7]提出了一种抗压缩的算法, 算法用于抵抗 H264/AVC 压缩攻击, 应用于 IWT(Integer Wavelet)域。该算法将一帧视频分为若干块。每一块中, 计算不同元素之间的差值做直方图, 利用多水平尺直方图转换机制嵌入信息。Li^[8]提出一种能抵抗重压缩和转码的视频水印算法, 该算法首先将水印进行 Arnold 转换, 然后嵌入的帧选择每次场景变换前的帧, 将选择的帧划分为与水印长度相同的块个数, 每块中嵌入 1bit 水印信息。

奇异值分解是一种特殊的矩阵变换, 变换产生的奇异值具有稳定的特性。目前有一大类鲁棒图像水印算法是基于奇异值调制完成水印嵌入的。奇异

值分解可以分别应用于空域和频域。在空域算法中, 算法直接对像素值做奇异值分解; 而在频域中, 算法对于变换后的像素值做奇异值分解, 这些变换包括 DCT、DWT 等。Tsai^[9]提出了一种能抵抗信号处理和几何攻击的 DWT-SVD 算法, 这个算法虽然对于多种攻击都具有良好的鲁棒性, 但是嵌入和提取过程较为复杂, 算法复杂度很高。Adul^[10]提出了一种基于空域的奇异值分解算法, 秘密信息嵌入到 RGB 的绿色通道中, 因为绿色通道在三通道中有更大的值, 相对于蓝色通道和红色通道能抵抗更大的扰动。Sharma^[11]提出了一个针对彩色视频序列的有效的水印算法。首先, 从视频序列中随机选择一帧。为了获得运动部分, 从所有通道的所有帧中减去此帧。然后对这一帧做 DWT 变换, 选择 LL 波段进一步进行 DWT 变换。然后选择这个二层 DWT 变换后的图像中的 HH 子带, 并使用 SVD 变换进一步处理。Ye^[12]提出了一种基于多层 DCT 变换的 DWT-SVD 鲁棒水印方法。首先载体图像做 DWT 变换, 获得低频子频带系数, 然后进行分块, 每个块进行多层 DCT 变换。最终, 根据需要的嵌入容量, 选择若干个系数组成一个新的矩阵, 然后做 SVD 变换, 将待嵌入的水印嵌入到最大奇异值中。Kabra^[13]出了一种基于 LWT(lifting wavelet transform)和 SVD 的图像鲁棒隐写方法。在这个方法中, 水印不是直接嵌入到小波系数中而且经过小波变换和 SVD 双重变换。本文中 LWT 变换代替了鲁棒水印常用的 DWT 变换构造了第二代小波。通过 LWT 方法构造第二代小波分为三个步骤分解, 预测和更新。

量化索引调制(QIM)算法是一种基本的嵌入方法, 并具有一定的鲁棒性, 它根据待嵌入的信息, 把原始载体数据量化到不同的索引区间, 其本质是微调载体值至指定的量化电平, 从而在获得具有较高鲁棒性的嵌入的同时, 具有较小的嵌入失真。QIM 首先由 Chen 和 Wornell^[14]于 1999 年提出。两年后, 他们提出了原始 QIM 的一个扩展 DM^[15]。原始 QIM 和 DM 使用了固定步长, 为了提高鲁棒性, Li^[16]提出了一种自适应的基于改进的 Watson^[17]视觉模型的 DM-MW 算法。实验结果表明, 在相同 DWR 下, 最后一种算法的 Watson 距离最短, 说明视觉上最不容易被发现, 对于各种攻击 DM-MW 算法鲁棒性最好。Perez-Gonzalez 等人^[18]提出合理抖动量化算法(RDM), RDM 主要是在编解码端同时使用对增益不变的自适应量化步长来实现。Li^[8]还提出了 RDM-MW 算法, 修改 Watson 视觉感知模型中的亮度掩蔽公式, 使亮度掩蔽门限随图像幅度缩放自行

调整,具有一定的自适应性,不过它的自适应量化步长在嵌入水印前后有所不同,当量化步长与嵌入水印系数不能匹配时,会造成解码错误。RDM-MW在几种算法中针对亮度缩放攻击 BER(Bit Error Rate)最小,鲁棒性最好。

Huang^[19]提出了一种基于3D DCT的QIM算法,通过计算两次DCT变换后的AC系数的和然后根据嵌入的数据对和做修。Langelaar等^[20]提出了一种基于MPEG视频的差分能量水印(DEW)方案。Ma^[21]针对DEW算法的不足,结合QIM算法优点,并改善其系数级嵌入鲁棒性不足的缺点,提出了水印差分能量调制(DEM)算法。DEM的主要思想是:以嵌入块的差分能量序列作为载波信号,以水印位为调制信息,采用抖动调制方法,将量化块中水平子区域与垂直子区域之间的能量差值调制为与待嵌入水印位相匹配的信号值。

本文面向视频网站对应的转码信道,兼顾负载能力、鲁棒性和安全性方面的考虑,提出了具有实用价值的视频隐蔽通信方案,具体贡献如下:

(1) 结合视频压缩编码特性,提出了面向视频空域的DWT+SVD自适应嵌入框架;

(2) 在所提框架下,设计了基于块亮度和纹理复杂度的自适应嵌入策略;

(3) 针对隐写嵌入产生的块效应,提出了一种视觉闪烁消除算法。

本文第2节阐述了本文的研究背景,包括视频分享网站转码操作分析与结论归纳,奇异值稳定性分析与实验论证,视频帧间闪烁的产生原理与解决方案;第3节详细描述了提出的基于自适应奇异值调制的鲁棒隐写算法,包括嵌入框架和实施细节;第4节为实验结果与结果分析,从嵌入对载体视频的视觉质量,码率变化和算法鲁棒性三方面的影响对算法性能进行验证;第5节对全文做总结。

2 研究背景

2.1 转码信道

随着网络的发展与普及,我国网民数量逐年递增,成为网民人数最多的国家。与此同时,我国视频网站用户量也每年递增,位居全球首位^[22]。每天海量视频在网络中传输,相关流量已占网络总流量一半以上。这为以视频为载体的隐蔽通信提供了很好的应用背景。

目前国内外视频网站多达上百个,国内主流视频网站包括:优酷、爱奇艺、腾讯视频、搜狐视频等;国外主流视频网站包括:Youtube、Vimeo等。本文选择优酷、Vimeo为代表,对视频网站的共性特点进行采样研究。

首先,用户上传载体视频到视频网站,网站会对视频进行审核,然后对审核通过的视频进行转码操作,最后在网站发布,供用户下载。由于转码操作会对载体视频的码率、GOP结构、QP值等产生影响,导致视频编码模式发生变化。所以载体视频中嵌入的秘密信息遭到破坏,无法正确提取。

所有网站的转码机制都是用户不可见的,为了对相关共性特性进行研究,本文采用了使用大量不同分辨率、码率的视频进行迭代上传下载实验,流程如图1,每次下载后的视频直接用于下次上传。根据实验结果,不同网站转码机制的共性特点总结如下:

(1) 网站采用H.264编解码标准,符合网站规格的视频上传下载后帧率、分辨率可以保持不变;

(2) 视频上传下载后的码率、大小、宏块QP值、GOP组都会发生变化;

(3) 同一视频经过多次迭代上传下载后,视频的某些特性趋于稳定。

实验结果再次表明,转码视频很多压缩特性都发生了不可预知的改变,这使得基于压缩域嵌入的信息无法被正常提取。

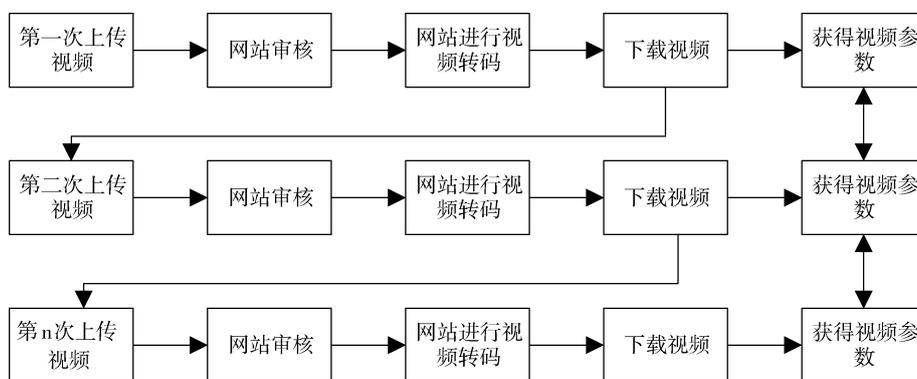


图1 网站测试流程

Figure 1 Website testing process

2.2 奇异值分解

奇异值分解(SVD)是一种特殊的矩阵变换, 在图像处理领域有着广泛应用。图像奇异值分解的主要特征有: (1)快速将大量的信号能量压缩到很少的系数中。奇异值所表现的是图像的固有特征而非视觉特性, 为隐写的不可见性提供了保障; (2)数字图像的特征值很稳定, 经过常规的图像处理, 特征值的变化很微小。因此, 将隐蔽信息嵌入到特征值中有很好的鲁棒性。这两个特征使得奇异值分解在图像鲁棒水印领域有广泛应用。

设矩阵 $A = \{a_{ij}\}_{m \times n}$, 且 $a_{ij} \geq 0$, 对 A 进行奇异值分解, 有:

$$A = USV^T = \sum_{i=1}^r \lambda_i U_i V_i^T \quad (1)$$

其中 U 、 V 分别为 $m \times m$ 和 $n \times n$ 的正交矩阵; S 是非负对角阵, S 中的 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_r$ 称为矩阵 A 的奇异值, U_i 和 V_i 为奇异值 λ_i 对应的正交矩阵。且满足 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_r > 0$, 其 r 为 A 的秩。

分解得到的最大奇异值具有较强的稳定性, 假设矩阵 A 受到某种扰动成为 $B = A + E \in R^{m \times n}$, B 的最大奇异值相对于 A 具有稳定性, 分析过程如下:

分别对 A , B 执行 SVD 变换, 可得 $A = USV^T = \sum_{i=1}^r \lambda_i U_i V_i^T$, $B = \hat{U} \hat{S} \hat{V}^T = \sum_{i=1}^r \xi_i \hat{U}_i \hat{V}_i^T$, 根据 SVD 理论^[23]

$$\|S - \hat{S}\|_2 < \varepsilon, \varepsilon = \varepsilon(E) \quad (2)$$

故对任意的 i , 有:

$$|\lambda_i - \xi_i| < \varepsilon \quad (3)$$

当 $\varepsilon \rightarrow 0$ 时, $S \rightarrow \hat{S}$ 即 $\lambda_1 \rightarrow \xi_1$ 。

以上分析说明一个矩阵 A 施加一个微小的扰动, A 的最大奇异值具有一定的稳定性, 本文设计了以下实验进行验证。

选取三种不同分辨率的视频, 分别为 QCIF 格式 (176×144)、CIF 格式 (352×288)、480p (720×480), 每种格式选择 2 个视频, 共 6 个视频作为测试视频。在每个选取的视频中随机抽取 20 帧组成 1 个新测试视频, 将每个测试视频的 YUV 序列中提取出 Y 分量, 然后将每帧划分为 16×16 的互不重复的宏块, 对每个宏块进行离散小波余弦(DWT)变换, 然后对低频数据块进行 SVD 变换, 得到每个宏块的最大奇异值 λ_i 。我们用最大奇异值变化率 $V\lambda_i^A$ 来度量每个块奇异值的稳定性。

$$\Delta\lambda_i^A = \lambda_i^A - \lambda_i^A \quad (4)$$

$$V\lambda_i^A = \Delta\lambda_i^A / \lambda_i^A \quad (5)$$

其中, λ_i^A 是上传前载体视频的第 i 个奇异值; λ_i^A 是下载后的载体视频的第 i 个奇异值; $\Delta\lambda_i^A$ 是经过视频网站转码信道后第 i 个奇异值的变化量; $V\lambda_i^A$ 是经过转码信道后的第 i 个奇异值改变量。

测试在 Matlab2016b 环境下进行, 采用了 H.264/AVC JM10.2 的编码器, 分别对最大奇异值、第二奇异值、第三奇异值和第四奇异值进行测试。

测试结果如图 2 所示, 根据测试数据可以得到以下结论: (1)经过视频网站信道转码, 最大奇异的变化量小于其他奇异值, 最大奇异值稳定性最好; (2)对于三种分辨率的视频, 最大奇异值都有最好的稳定性。

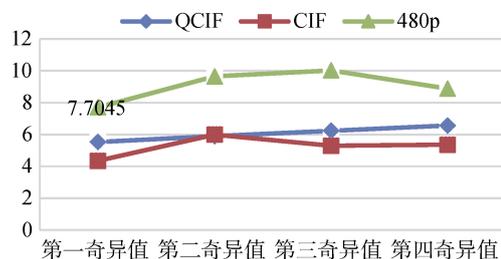


图 2 最大奇异值稳定性实验结果

Figure 2 Experimental result of maximum singular value stability

2.3 闪烁消除

奇异值分解由于其良好的稳定性, 是图像领域一种常用的图像处理手段, 但是由于改变某一个奇异值会对整块像素值产生影响, 使得当前块和周围块的亮度值产生差异, 这种空间上的不连续性在视觉上的表现就是块效应。

对于视频来说, 修改奇异值不但会造成空间上的不连续还会造成时序上的不连续。对视频帧划分子块, 然后对子块进行奇异值分解, 由于隐写算法对相邻帧相同位置的块的奇异值做了大小不同的改变, 所以破坏了视频相邻帧之间的亮度连续性, 这种块效应在连续播放时就表现为一种视觉闪烁。闪烁效应不但影响视觉质量而且不满足隐写算法对于隐蔽性的基本要求, 必须加以抑制消除。从信号频率角度分析, 闪烁信号属于一种低频信号^[24]。目前, 已有的关于闪烁问题的研究主要分为非线性模型法和线性模型法。非线性模型是将前后两帧图像之间的亮度关系视为一种非线性变化的数学模型, 通过估计这种非线性模型来消除两帧存在的闪烁。Naranjo^[25]等提出了一种基于直方图匹配的灰度映射

估计方法,其思路是以多帧图像的直方图均值为参考直方图,并假设参考直方图均衡后的结果与待去闪烁帧图像直方图均衡后的结果一致。Vlachos^[26]提出了一种基于视频图像中曝光不均的模型估计方法,其主题思想就是分析曝光强度、感光密度和图像灰度之间的关系,并建立数学模型。该方法从原始曝光问题进行分析,更具有物理意义。更多的研究是以线性模型作为闪烁问题的研究模型对象,对线性模型中的闪烁增益参数和闪烁偏移量参数进行估计和修复处理。文献[27]提出了以视频镜头所有帧的灰度平均值为基准,补偿镜头中每一帧与平均值的差值来直接修正亮度闪烁,这是一种最简单的基于亮度偏移量估计的线性模型。文献[28]提出一种零阶线性模型,该方法通过前后帧图像的最大最小灰度值以及图像均值来估计模型参数,但该方法将单帧画面的闪烁参数看作一个固定值,而没有考虑它们在空间上的变化。

目前已有的算法为了消除相邻两帧存在的频闪效应多采用遵循线性或非线性模型对相邻两帧像素值修改的方式。但是这些方法并不适用于隐写算法中的闪烁消除。如果对每帧的像素值都进行修改,将会破坏嵌入的信息,降低提取正确率。

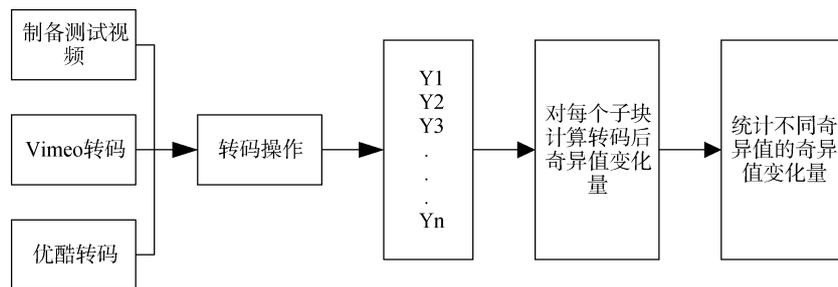


图3 最大奇异值稳定性测试过程

Figure 3 Test procedure of maximum singular value stability

3 基于奇异值的鲁棒隐写算法

为了提高嵌入的隐蔽消息在视频转码后的生存能力,本文基于原始视频帧的Y分量,通过对其小波低频分量的奇异值应用量化索引调制来实现秘密信息的嵌入。

3.1 算法框架

本节在第2节的基础上,提出基于DWT+SVD的自适应嵌入框架,如图4所示,该框架主要包括小波变换、奇异值分解、自适应量化索引调制等三个部分。具体地,首先对载体视频进行解码,得到YUV序列。然后以每三个相邻视频为一组化为互不重叠的视频组。对每个视频组中的三帧视频提取Y分量,然后进行分块,对每个子块执行DWT, SVD变换;对于嵌入帧,然后计算每个

基于奇异值调制的视频隐写算法出现闪烁的主要原因是相邻帧相同位置的子块像素值的连续性被破坏。因此,为了避免嵌入信息被破坏,本文并没有采用已有消除方法修改相邻两帧像素值,建立线性或非线性关系的方法,而是通过设立调整帧的方法,对相邻消息帧之间的跳变进行缓冲。具体方法如下:将视频分为一系列连续不重叠的视频组 $G_1, G_2, G_3, \dots, G_n$,每个视频组 G_i 由三帧连续视频组成, $G_i = \{F_{j-1}, F_j, F_{j+1}\}$ 设嵌入过程为 c :

$$F'_{j-1} = c(F_{j-1}) \quad (6)$$

$$F'_j = F_j \quad (7)$$

$$F'_j = F_j F'_{j+1} = c(F_{j+1}) \quad (8)$$

在嵌入时,每个视频组中的头尾两帧作为消息帧正常嵌入,中间一帧作为调制帧用于抑制闪烁效应,而不承载消息:

$$F'_j = \alpha F'_{j-1} + \beta F'_{j+1} \quad (9)$$

其中, α 和 β 代表两个调整因子,根据嵌入算法的不同进行设置。经过实验,本文选择 $\alpha = \frac{1}{2}$ 和 $\beta = \frac{1}{2}$ 。

子块的亮度值和纹理复杂度,根据这两个值确定量化步长,然后使用量化索引调制的方法嵌入BCH编码后的信息;对于非嵌入帧,修改最大奇异值消除闪烁效应。最后对视频进行编码,形成H.264码流。

提取是嵌入的逆过程,本算法实现对秘密信息的盲提取,即不需要原始视频的参与,提取流程图如图5所示。首先对视频进行解码,得到YUV序列。然后以每三个相邻视频为一组化为互不重叠的视频组。然后提取Y分量,然后进行分块,对每个子块执行DWT, SVD变换;对于嵌入帧,然后计算每个子块的亮度值和纹理复杂度,根据这两个值确定量化步长,然后使用量化索引调制的方法提取信息;对于非嵌入帧,不做处理。提取出的信息经过BCH解码得到秘密信息。

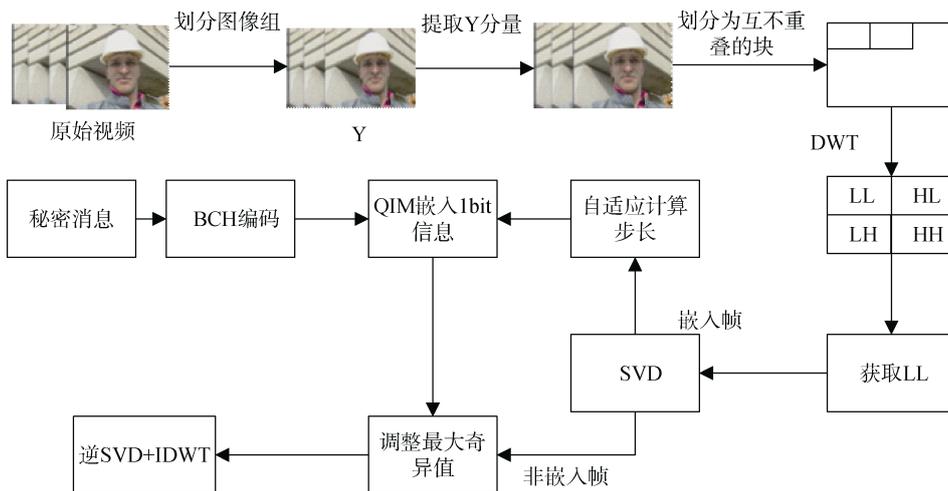


图 4 嵌入流程图

Figure 4 Flow diagram of embedding

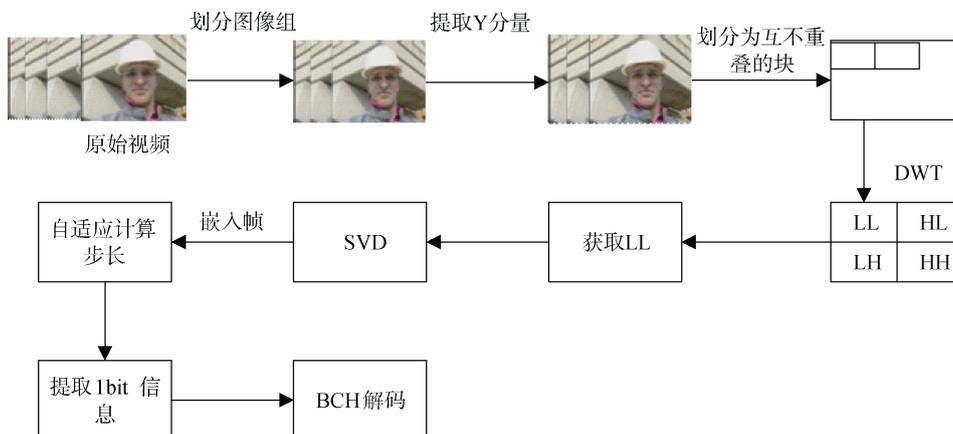


图 5 提取流程图

Figure 5 Flow diagram of extraction

3.2 奇异值的量化索引调制

设矩阵 $A = \{a_{ij}\}_{m \times n}$ ，其中奇异值为 $r \lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_r > 0$ ，其中 r 为 A 的秩。当 $r < 1$ 时， A 为零矩阵数据块或镜面数据块，需要进行预处理：当 $r = 0$ 时， $\lambda_1 = 500$ 。为了在 A 中嵌入 1bit 秘密信息 f_w ，先量化调整最大奇异值，然后执行 SVD 反变换。

设量化步长为 q ，对最大奇异值 λ_1 的量化方法如图 6 所示，将数轴划分为两类区间，即 $[(k-1)q, kq]$ 与 $[(2k-1)q, 2kq]$ ，其中 k 为不小于 1 的整数。当嵌入 $f_w = 0$ 时，将 λ_1 调整到 $[(k-1)q, kq]$ ；当嵌入 $f_w = 1$ 时，将 λ_1 调整到 $[(2k-1)q, 2kq]$ 。具体计算方法如下：

$$\lambda'_1 = \begin{cases} \left\lfloor \frac{\lambda_1}{q} \right\rfloor + \frac{2}{q} & \text{if } \left\lfloor \frac{\lambda_1}{q} \right\rfloor \% 2 = f_w \\ \left\lfloor \frac{\lambda_1}{q} \right\rfloor - \frac{2}{q} & \text{if } \left\lfloor \frac{\lambda_1}{q} \right\rfloor \% 2 \neq f_w \end{cases} \quad (10)$$

$$\& \& \left\lfloor \frac{\lambda_1}{q} \right\rfloor q > \lambda_1$$

$$\left\lfloor \frac{\lambda_1}{q} \right\rfloor + \frac{2}{q} & \text{if } \left\lfloor \frac{\lambda_1}{q} \right\rfloor \% 2 \neq f_w$$

$$\& \& \left\lfloor \frac{\lambda_1}{q} \right\rfloor q \leq \lambda_1$$

其中， λ'_1 为量化操作后的最大奇异值， $\text{floor}()$ 为向下取整操作， $\%$ 为取余数操作。

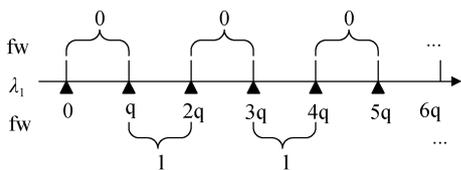


图6 最大奇异值量化规则

Figure 6 Maximum singular value quantization rule

然后通过 SVD 反变化得到嵌入 1bit 秘密消息的数据块 A' 。

3.3 自适应调整量化步长

为了保证嵌入算法具有良好的不可见性和较强的鲁棒性,通常需要考虑人眼的视觉特征 HVS (Human Visual System)^[29]。即在保证不可见性的基础上,自适应的改变 SVD 的量化步长,兼顾鲁棒性和视觉质量保持方面的需求。HVS 的主要特性^[22]包括:

(1) 频率敏感性:从变换域的角度来看,对图像进行变换后,变换系数分为高频和低频部分。其中高频部分对应于纹理和边缘区域,而低频部分对应于平滑区域。实验^[30]表明人眼对高频部分加入的噪声有较小的敏感性;

(2) 亮度敏感性:对于图像中的一个区域来说,若平均亮度越大,则其掩蔽性越强。亮度平均值低的区域,对亮度值的较小修改也会引起图像可感知的失真,因此水印应该尽量加在平均亮度值较大的图像区域;

(3) 边缘及纹理掩蔽特性:图像边缘部分的信息对图像的意义较大,边缘的像素亮度、像素位置的改变往往会引起视觉上较大的失真,因此水印的嵌入应该避免影响到图像边缘区域。

人眼敏感度存在着一个界限值。若低于界限值,人类视觉系统就无法感受到秘密信息的存在,从而也就实现了不可见性,但过低的界限值会降低鲁棒性;若高于此值,鲁棒性增强,但视频就会出现失真。对于不同的子块,相应的界限值也不同。而界限值的选定受到视频本身特性(如背景纹理复杂度或亮度)等因素影响。为了使算法的不可见性与鲁棒性之间达到最佳平衡,本文对载体视频的低频带小波系数进行合理分块,根据子块本身亮度、纹理及边缘特性计算特征值并进行分类,根据分类结果选择量化步长,从而实现自适应的嵌入信息。

首先将每一帧划分为互不重叠的 $m \times m$ 大小的子块,其次考虑以下视觉特性:

(1) 图像亮度对嵌入的敏感程度。图像亮度很大或者很小时,对嵌入信息不敏感。图像纹理复杂度对

嵌入的敏感程度。图像纹理复杂度越高,嵌入信息可见的阈值越高,所以对嵌入信息不敏感;纹理复杂度越低,对嵌入信息越敏感;

(2) 我们对 $m \times m$ 大小的子块进行亮度划分,子块 A 的亮度值 L 可用下式得到^[31]:

$$L = \frac{1}{m \times m} \sum_{A(i,j)} f_{ij} \quad (11)$$

其中, f_{ij} 是 (i, j) 位置的像素值。若 $L \geq T$, 那么子块 A 为亮子块, 否则该块为暗子块。

子块 A 的块纹理复杂度可定义为^[31]:

$$S = \sum_{A(i,j)} |f_{ij} - L| \quad (12)$$

子块的熵值计算如下^[31]:

$$E = - \sum_{A(i,j)} p_{ij} * \log p_{ij} \quad (13)$$

$$p_{ij} = \frac{f_{ij}}{\sum_{A(i,j)} f_{ij}} \quad (14)$$

根据子块的亮度值、纹理复杂度和熵值三个指标的不同,所有帧的子块可以被分为 4 类:

第 1 类亮度较低,且纹理简单,人类视觉系统对其中像素值的改变较敏感,嵌入秘密信息的强度应最小;

第 2 类亮度较高,纹理复杂,且是边缘,嵌入秘密信息的强度应较小;

第 3 类亮度较高,纹理复杂,且不是边缘, HVS 对其中像素值的改变敏感性最弱,嵌入秘密信息的强度应最大;

其余为第 4 类。

设不同类的子块选择的 QIM 量化步长为 b , 经过仿真实验 b 取下面的值:

$$b = \begin{cases} 40 & \text{第一类} \\ 45 & \text{第二类} \\ 60 & \text{第三类} \\ 45 & \text{第四类} \end{cases} \quad (15)$$

以 720×480 视频“river”为例,随机选择视频中的一帧。将视频帧划分为 16×16 互不重叠的子块,根据(1)—(2)计算子块的特征,然后进行分类,选择各子块的量化步长完成嵌入。嵌入结果如图所示,图 7 是没有结合人眼视觉模型,采用固定步长方式嵌入的结果,图 8 是结合人眼视觉模型,采用自适应步长方式嵌入的视频。通过对比可以看出,采用固定量化步长的视频存在块效应,人眼可以看出嵌入痕迹而采用变化步长的视频人眼无法感知嵌入。



图 7 固定步长嵌入后视频

Figure 7 Fixed Qstep embedded video



图 8 变化步长嵌入后视频

Figure 8 Change Qstep embedded video

3.4 BCH 纠错码

为了应对转码造成的突发/连续错误, 本文提出算法使用了 BCH 纠错码对待嵌入信息进行预处理。

BCH 纠错码使用有限域上的域和多项式, 通过构造检测多项式来检测接收端是否有错误发生, 在实际应用中, 使用最多的是码元取自 GF(2) 中的二进制 BCH 编码。对于任意一个整数 m , 一定可以构造出以下的二进制 BCH 码的生成多项式:

$$g(x) = m_1(x)m_3(x)\cdots m_{2t-1}(x) \quad (16)$$

式中, $m_i(x)$ 是 $\alpha^i (1 \leq i \leq 2t)$ 的最小多项式, 该 BCH 码可以纠正 t 个错误, 以 $\alpha^1, \alpha^3, \alpha^5, \dots, \alpha^{2t-1}$ 为根, 码长为:

$$n = LCM(e_1, e_3, \dots, e_{2t-1}) \quad (17)$$

其中, $e_1, e_3, \dots, e_{2t-1}$ 分别是 $\alpha^1, \alpha^3, \alpha^5, \dots, \alpha^{2t-1}$ 元素的级, 码的校验矩阵是:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \dots & \alpha^{n-2} & \alpha^{n-1} \\ 1 & \alpha^3 & \dots & (\alpha^3)^{n-2} & (\alpha^3)^{n-1} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ 1 & \alpha^{2t-1} & \dots & (\alpha^{2t-1})^{n-2} & (\alpha^{2t-1})^{n-1} \end{bmatrix} \quad (18)$$

其中, \mathbf{H} 为一个 $n \times (n-k)$ 矩阵, 显然, 二进制 BCH 码的码长是 $2^m - 1$ 或者是 $2^m - 1$ 的一个因子。

二进制 BCH 编码通常表示为 $BCH(n, k, t)$, 其中 n 表示 BCH 编码长度, k 表示需要编码的信息长度, t 表示能够纠正的错误比特个数。由 BCH 的编码特性可知, 校验位越长, 纠错能力越高, 同时, 计算复杂度越高, 为了保证适当的嵌入容量, 需要在嵌入信息位数和校验位数之间取得平衡, 使得具有一定嵌入容量的同时由具备良好 的纠错能力。

3.5 嵌入与提取流程

在 3.1 所提的嵌入框架下, 本文结合自适应嵌入策略, 具体完成一个完整可操作的算法设计, 其具体嵌入/提取步骤描述如下:

3.5.1 嵌入流程

(1) 将原 YUV 视频分为一系列视频组 $G_1, G_2, G_3, \dots, G_n$, 每个视频组 G_i 由三帧连续视频组成, 且每一帧仅在一个视频组中 $G_i = \{F_{j-1}, F_j, F_{j+1}\}$ 中。其中 F_{j-1} 和 F_{j+1} 作为嵌入帧, F_j 作为非嵌入帧;

(2) 每帧的亮度分量 Y 分量划分为互不重叠的子块, 记为 $A_i (i=1, 2, \dots, N)$, 其中 Y 的分辨率为 $m \times n$, $N = (m/M) \times (n/M)$;

(3) 对子块 A_i 执行 DWT 分解, A_i 的四个子带分别为 $A_{i,LL1}, A_{i,LH1}, A_{i,HL1}, A_{i,HH1}$, 选择 $A_{i,LL1}$ 作为嵌入域;

(4) 计算子块 A_i 视觉特征值, 包括亮度值 L , 块纹理复杂度 S 和子块的熵值 E , 根据第 3.3 节的内容, 划分子块所属类, 选择合适的量化步长 q_i ;

(5) 对子块 A_i 进行 SVD 变换, 得到最大奇异值 λ_i 。如果是嵌入帧执行步骤(6), 否则执行步骤(7);

(6) 根据第 3.1 节的 QIM 方法按步长 q_i 修改最大奇异值完成嵌入 1bit, 然后执行步骤(8);

(7) 按照第 2.3 节的方法, 根据已嵌入帧的最大奇异值, 修改非嵌入帧的最大奇异值, 建立每个视频组三帧之间的线性关系;

(8) 反复执行第(5)步, 直到每个数据块 A_i 都得到了处理;

(9) 对 Y 分量中的每个子块 A_i , 都执行逆 DWT 变换, 得到含有秘密消息的单帧亮度分量 Y' ;

(10) 重复执行上述(1)–(9)步, 得到含有秘密信息的 YUV 视频, 然后经过本地转码信道进行 H.264 编码, 得到嵌入后的视频。

3.5.2 提取流程

(1) 将 YUV 分为一系列视频组 $G'_1, G'_2, G'_3, \dots, G'_n$, 每个视频组 G'_i 由三帧连续视

频组成, 且每一帧仅在一个视频组中 $G'_i = \{F'_{j-1}, F'_j, F'_{j+1}\}$ 。其中 F'_{j-1} 和 F'_{j+1} 作为嵌入帧, F'_j 作为非嵌入帧;

(2) 每帧的亮度分量分量划分为互不重叠的子块, 记为 $A'_i (i=1, 2, \dots, N)$, 其中 Y' 的分辨率为 $m \times n$, $N = (m/16) \times (n/16)$;

(3) 对子块 A'_i 执行 DWT 分解;

(4) 计算子块 A'_i 视觉特征值, 选择合适的量化步长 q'_i ;

(5) 对子块 A'_i 进行 SVD 变换, 得到最大奇异值 λ_i 。如果是嵌入帧执行步骤(6), 否则执行步骤(7);

(6) 以量化步长 q'_i 对 A'_i 进行反量化;

(7) 重复执行上述(1)—(5)步, 提取出嵌入信息;

(8) 对提取出的信息进行 BCH 解码得到秘密消息。

4 实验与分析

为了对所提算法性能进行测试, 本文基于 Matlab 2015b 与 H.264/AVC JM10.2 搭建了所需实验环境。

4.1 设计要素测试

3.1 节提出嵌入框架中有三个影响嵌入效果的关键设计要素, 分别是分块大小、QIM 步长及纠错码。本节通过三个实验, 分别对这三个设计要素对于鲁棒性的影响进行测试。首先对 YUV 视频序列嵌入其次使用固定 QP 值的方法进行编码然后降低 QP 值, 对载体视频转码。

首先测试了分块大小不同对 BER 的影响, 为便于运算, 本文选取了 4×4 、 8×8 、 16×16 三种分块大小, 在使用自适应 QIM 步长, BCH(15, 5, 3) 纠错码的情况下, 对 480p 视频“aspen”进行嵌入, 实验结果记录于图 9。可以看出, 随着分块尺寸加大, BER 呈明显下降趋势。但是由于每块中嵌入 1bit 信息, 分块越大, 嵌入率越低。考虑到嵌入率和鲁棒性的平衡, 本文算法采用的块大小为 16×16 。

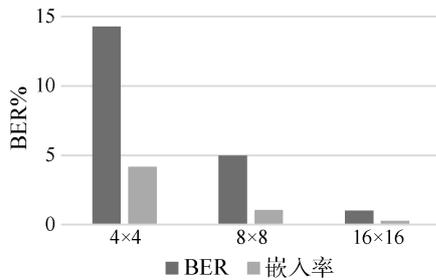


图 9 分块大小与鲁棒性的关系

Figure 9 Relationship between block size and robustness

实验固定分块大小为 16×16 , 纠错码为 BCH(15, 5, 3), 分别使用固定 QIM 步长和自适应 QIM 步长对四个测试视频进行嵌入, 实验结果记录于图 10。可以看出, 自适应变化步长的嵌入方法有助于鲁棒性的提高。

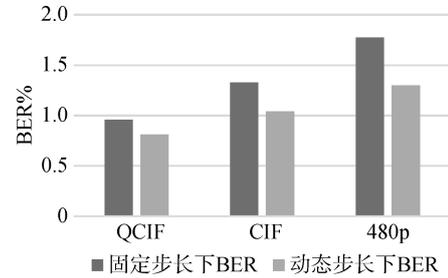


图 10 步长与鲁棒性的关系

Figure 10 Relationship between Qstep and robustness

实验固定分块大小为 16×16 使用自适应 QIM 步长, 分别使用三种 BCH 编码(7, 4, 1)、(15, 5, 3)和(63, 7, 15)对嵌入信息进行预处理, 实验结果记录于图 11。可以看出, 对同一视频嵌入的信息使用(7, 4, 1)、(15, 5, 3)、(63, 7, 15)三种不同的 BCH 纠错码编码, (63, 7, 15)能达到最小的 BER。但是随着纠错位数的上升, 冗余纠错位也在变长, 能携带的信息变短。考虑到纠错能力和嵌入率的平衡, 本算法选择了 BCH(15, 5, 3)。

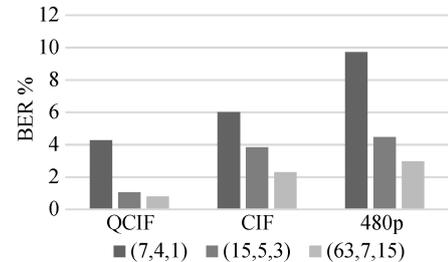


图 11 纠错码和 BER 关系

Figure 11 Relationship between Error correction code and BER

综合实验结果, 本文提出嵌入方法使用 16×16 分块, 自适应 QIM 步长以及 BCH(15, 5, 3) 纠错码。

4.2 对视觉质量的影响

为了评价嵌入算法对视频视觉质量的影响, 本文从人眼主观评价和客观评价两个方面进行验证。

图 12 分别展示了两个原始视频和嵌入后的视频第 10 帧的图像。通过对比可以看出, 从人眼主观视觉感知上图 12(a)与(b)以及(c)与(d)难以分辨差别。通过测试视频前一百帧发现, 除了在少数区域能发

现轻微的人工痕迹外, 其他区域观察不到嵌入痕迹。

本文用视频 Y 分量 PSNR 改变量对嵌入算法对视频质量的影响进行评价:

$$\Delta PSNR = PSNR_s - PSNR_c \quad (19)$$

实验结果如图 13 所示, 可以看到嵌入秘密消息后, 分辨率分别为 QCIF、CIF 和 480p 的三个测试视频, $\Delta PSNR$ 的波动区间分别为 $[-10.13\%, -14.76\%]$ 、 $[-5.4\%, -14.21\%]$ 和 $[-11.06\%, -17.3\%]$ 。这表明, 为了获得鲁棒性, 视频的视觉质量在一定程度上被牺牲了。



(a)“aspen”嵌入前
(a)“aspen” before embedding



(b)“aspen”嵌入后
(b)“aspen” after embedding



(c)“rush_hour”嵌入前
(c)“rush_hour” before embedding



(d)“rush_hour”嵌入后
(d)“rush_hour” before embedding

图 12 视频嵌入前后

Figure 12 Video before and after embedding

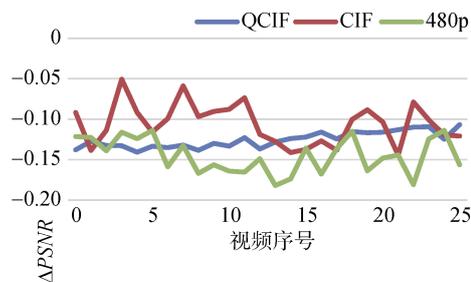


图 13 嵌入与未嵌入的视频 PSNR 变化

Figure 13 Comparison of PSNR before and after embedding

另外, 文献[20]提出一种基于 HVS 客观评价的方法 SSIM(Structural Similarity Index), 度量结果与人眼观察的结果更一致。这种度量方法在广播电视中广为使用。SSIM 的度量值在 0 到 1 的范围内, 结果为 0 时, 表示比较对象完全不一样; 结果为 1 时, 表示比较对象完全一致。为了更好的说明嵌入算法对视觉质量的影响, 本文还是用了结构相似度变化量 $\Delta SSIM$:

$$\Delta SSIM = SSIM_s - SSIM_c \quad (20)$$

其表示含密视频的 SSIM, $SSIM_c$ 其中 $SSIM_s$ 表示含密视频的 SSIM, $SSIM_c$ 表示编码参数相同未载密视频的 SSIM。图 14 表示了不同测试视频不同帧上的 $\Delta SSIM$ 值的变化。可以看到 $\Delta SSIM$ 的变化范围在 0.003 到 0.12。根据 SSIM 的度量, 由嵌入引入的视觉下降可以忽略。

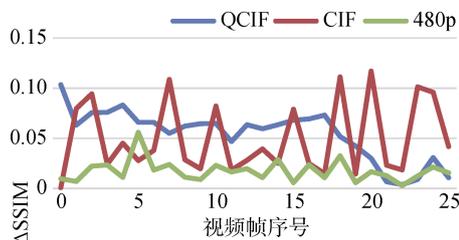


图 14 嵌入与未嵌入的视频 SSIM 变化

Figure 14 Comparison of SSIM before and after embedding

4.3 对码率的影响

本文使用码率变化率 ΔR 来度量嵌入算法对视频码率的影响。

$$\Delta R = \frac{R'_c - R_c}{R_c} \quad (21)$$

其中, R'_c 表示原始视频的码率, R_c 表示嵌入后视频的码率。图 15 展示了嵌入前后码率的比较, 可以看到三个测试视频码率变化分别为 5.0%、11.76%和 4.73% 码率平均增加 7.16%。码率增加主要由两方面原因造成: (1)对第一奇异值的量化主要以前向量化为主, 导致大部分数据块第一主元信息增加; (2)信息的嵌入破

坏了原始数据的自然流畅分布, 信息的冗余度下降。

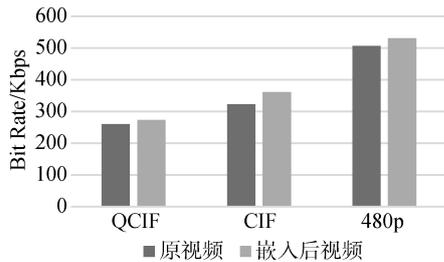


图 15 嵌入前后码率比较

Figure 15 Comparison of rate before and after embedding

4.4 抗转码测试

本文在实验中利用 X264 模拟不同参数下的转码攻击。控制码率就是控制不同的转码参数。H.264 通常采用固定 QP 值或固定 crf(conditional random field) 的方式来进行码率控制。

首先采用固定 QP 值的方法, H.264 编码中, QP 值与量化步长 Qstep 一一对应。QP 值是 Qstep 的标号, 取值 0—51。当 QP = 0 表示量化最精细; 相反当 QP = 51 时表示量化最粗糙。对含密载体视频进行转码, 选择 QP 值分别等于 26, 28, 30, 32, 34。统计转码参数 QP 和错误率之间的关系, 实验结果如图 16 所示, 可以看出对于四个测试视频, 错误率都小于 4%, 且当 QP=28 时, 提取信息的错误率最低。实验结果表明, 本文提出的方法具有较强的抵抗固定 QP 值转码方式的转码攻击的能力。

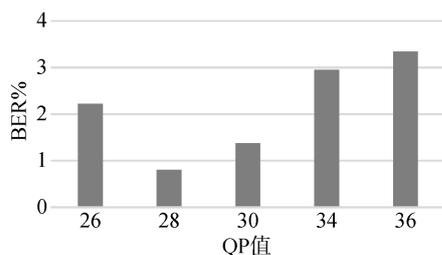


图 16 QP 值和 BER 关系

Figure 16 Relationship between QP value and BER

固定 crf 是另一种 H.264 码率控制方式, 在优先保证画面质量的情况下, 使用“-crf”参数来控制转码是比较适宜的。这个参数的取值范围为 0—51, 其中 0 为无损模式, 数值越大, 画质越差, 生成的文件却越小。经过调研, 主流视频网站转码器的 crf 范围在 19—25 之间。图 17 是四个测试视频的在不同 crf 值的条件下转码后提取信息得到的 BER。可以看到, 当

crf = 23 时, BER 最小, 平均 BER 为 2%。

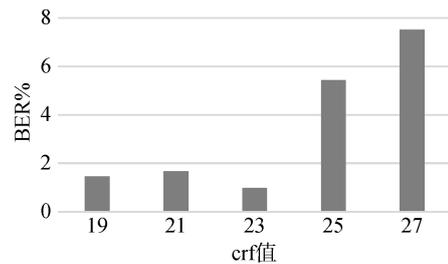


图 17 crf 值和 BER 关系

Figure 17 Relationship between crf value and BER

基于以上实验, 验证了本文提出的算法对于常用控制方式的转码攻击都具有较强的鲁棒性。根据调研结果, 目前视频网站的码率控制方式是根据上传视频的特性选择固定 QP 值、固定码率和固定 crf 值中的一种, 所以本文提出的算法对视频网站的转码攻击具有较高的鲁棒性。

5 结论

随着互联网和多媒体技术的发展, 基于视频的交换通信越来越频繁, 这给以压缩视频为载体的隐蔽通信提供了良好的引用背景。视频上传到视频网站后, 经过网站的转码操作, 下载后视频的码率、大小、宏块 QP 值、GOP 结构都会发生变化, 这直接导致当前绝大多数面向压缩域的隐写算法无法得到应用。针对这种情况, 本文提出了一个基于 DWT、SVD 的鲁棒隐写设计框架, 并在此框架下实现了一种具有良好抗转码性能的视频鲁棒算法, 该算法的特点在于: (1)通过自适应量化索引调制最大奇异值的方法, 实现抗转码攻击; (2)根据人眼视觉模型, 自适应的改变量化步长, 实现视觉效果和鲁棒性的平衡; (3)通过构建嵌入帧之间的线性关系, 消除了视频闪烁现象。实验结果表明, 该方法在不同程度的转码攻击下都有较好的消息恢复能力。

致谢 在此向本文成文中给予指导的老师、提供帮助的同学和给本文提出建议的评审专家表示感谢。

参考文献

- [1] Lin QiWei, "An error correction coding combined robust video watermarking algorithm for H. 264 standard," *International Conference on Anti-Counterfeiting, Security and Identification* IEEE, 2014.
- [2] Jing Zhang, "Robust Video Watermarking of H.264/AVC," *IEEE Transaction on Circuits and Systems II-Express Briefs* Vol.5, No.1, pp.205-209, 2007.

- [3] Le B. Y. and H. Lei, "blind and robust watermarking scheme for H.264 video," *International Conference on Communications, Circuits and Systems IEEE*, 2010
- [4] Kaur Sharanjeet, Pooja, and Varsh, "A Robust & Quality Improvement of Video Watermarking Using SVD & DWT," *IEEE 2016, International Conference on "computing for Sustainable Global Development IEEE*, 2016.
- [5] Yassin Nisreen I., N. M. Salem, and M. I. E. Adawy, "QIM blind video watermarking scheme based on Wavelet transform and principal component analysis." *Alexandria Engineering Journal* Vol.53, No.4, pp.833-842, 2014.
- [6] V. Holub and J. Fridrich, "Digital image steganography using universal distortion," In *1st ACM Information Hiding and Multimedia Security Workshop*, Montpellier, France, 2013.
- [7] M. A. Alavianmehr, M. Rezaei, M. S. Helfroush and A Tashk, "A reversible data hiding scheme for video robust against H.264/AVC compression," *International ISC Conference on Information Security and Cryptology IEEE(ISCISC)*, 2013.
- [8] Li, Xin, Wang X and Yang W, "A robust video watermarking scheme to scalable recompression and transcoding," *International Conference on Electronics Information and Emergency Communication IEEE(ICEIEC)*, 2016.
- [9] H.H. Tsai, Y.J. Jhuang and Y.S. Lai, "An An SVD-based image watermarking in wavelet domain using SVR and PSO," *Applied Soft Computer*, Vol.12, No.8, pp.2442-2453, 2012.
- [10] V. Adul and E. Mwangi, "A robust video watermarking approach based on a hybrid SVD/DWT technique," 2017 *IEEE AFRICON*, Cape Town, pp. 309-313, 2007.
- [11] Sharma, Sai Shyam, S. Thapa, and C. P. Tanay, "A Robust Color Video Watermarking Technique Using DWT, SVD and Frame Difference," *Pattern Recognition and Machine Intelligence*, pp.148-154, 2017.
- [12] Ye, xueyi, "A Multiple-Level DCT Based Robust DWT-SVD Watermark Method," *Tenth International Conference on Computational Intelligence and Security IEEE Computer Society (CIS)*, pp.479-483, 2014.
- [13] Kabra, Radhika G and S. S. Agrawal, "Robust embedding of image watermark using LWT and SVD," *International Conference on Communication and Signal Processing IEEE(CCISP)*, pp.1968-1972, 2016.
- [14] Chen B and Wornell G W, "An information-theoretic approach to the design of robust digital watermarking systems," *Acoustics, Speech, and Signal Processing*, vol. 4, no. 4, pp.2061-2064, 1999.
- [15] Chen B and Wornell G W, "Preprocessed and postprocessed quantization index modulation methods for digital watermarking," *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, pp.103-105, 2000.
- [16] Li Q and Cox I J, "Using perceptual models to improve fidelity and provide resistance to valumetric scaling for quantization index modulation watermarking," *IEEE Transaction Information Forensics and Security (TIFS)*, pp.127-129, 2007.
- [17] WATSON A B, "DCT quantization matrices visually optimized for individual images," *Proceedings of the SPIE: Human Vision, Visual Processing and Digital Display IV*, pp.202-216, 1993.
- [18] Perez-Gonzalez F, Mosquera C and BamiM, "Rational dither modulation :A high rata data hiding method invariant to gain attacks," *IEEE Transactions on Signal Processing*, pp.3960— 3975, 2005.
- [19] H Y Huang, CH Yang and WH Hsu, "Video watermarking algorithm based on pseudo 3D DCT and quantization index modulation," *Iapr*, vol. 5, no. 4, pp. 625-637, 2009.
- [20] LANGELAARG C and LAGENDIJK R R, "Optimal differential energy watermarking of DCT encoded images and video," *IEEE Transactions on Image Processing (TIP)*, pp.148 -158, 2001.
- [21] Ma Lihong, Xie Zhonghua and Liu Xiaoyan, "A New Differential Energy Modulation Algorithm for Video Data Hiding," *Journal of Image and Graphics*, 2010.
(马丽红, 谢中华, 刘小燕, "视频数据隐藏的差分能量调制新算法," *中国图像图形学报*, 2010 年)
- [22] "CNNIC released Internet report: China's number of Internet users jumped to the top in the world," http://www.gov.cn/jrzq/2008-07/24/content_1054956.htm, July. 2007.
- [23] Wilkinson J H, "The Algebraic Eigenvalue Problem. Oxford," UK: Clarendon Press, 1965.
- [24] Zhao Peidong, Han Jun and Yan Yougang, "Block Video Flicker Elimination Algorithm Based on Multi-frame Reference," *Journal of Shanghai University (Natural Science)*, Vol.16, No.4, pp.342-348, 2010.
(赵培栋, 韩军, 闵友钢, "基于多帧参考的分块视频闪烁消除算法", *上海大学学报(自然科学版)*, 2010, 16(4):342-348.)
- [25] V. Naranjo and A. Albiol, "Flicker reduction in old films," *Proceedings 2000 International Conference on Image Processing*, Vancouver, BC, Canada, pp. 657-659, 2000.
- [26] Vlachos T, "Flicker correction for archived film sequences using a nonlinear model," *IEEE Transactions on Circuits & Systems for Video Technology*, pp.508-516, 2004.
- [27] Wu Y and Suter D, "Historical film processing," *Spies International Symposium on Optical Science Engineering & Instrumentation*, 1995.
- [28] Abauzit C, "Restauration automatique de films anciens," *école nationale supérieure des mines de paris*, 1997.
- [29] Zhou B, Chen J, "A Geometric distortion resilient image watermarking algorithm based on SVD," *Image and Graphics*, Vol.9, No.4, pp.506-512, 2007.
- [30] Zhou Zude, Tang Bing and Liu Xinhua, "A block-SVD based image watermarking method," *Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation*, 2006.
- [31] Zhao Min, Wang Huiqin and Lu Lin, "Block-based SVD Adaptive Digital Watermarking Algorithm," *Computer Engineering and Design*, 2011.
(赵敏, 王慧琴, 卢麟, "基于分块 SVD 自适应数字水印算法", *计算机工程与设计*, 2011 年)



管萌萌 于 2012 年在武汉大学信息安全专业获得学士学位。现在中国科学院信息工程研究所计算机技术专业攻读硕士学位。研究领域为多媒体内容安全。Email: guanmengmeng@iie.ac.cn



曹纭 于 2012 年在中国科学院软件研究所获得博士学位。现任中国科学院信息工程研究所副研究员。研究领域为多媒体内容安全。研究兴趣包括: 隐写与隐写分析、数字内容取证等。Email: caoyun@iie.ac.cn



张怡暄 中国科学院信息工程研究所硕士研究生, 主要研究方向为隐写分析与数字图像取证。Email: zhangyixuan@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 年于上海交通大学获博士学位, 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 等期刊、会议的编委、主席或委员, 任中国电子学会通信与信息安全专委会、中国图象图形学会多媒体取证与安全专委会等学术组织的委员。曾承担国家自然科学基金、国家重点研发计划、中科院战略性先导专项、部委专项等任务 40 余项, 在 IEEE TIFS、ACM IH & MMSec 等本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、ACM IH & MMSec 最佳论文奖等荣誉。