

基于修改概率转换和非加性嵌入失真的视频隐写方法

李林聪 姚远志* 张晓雅 张卫明 俞能海

(中国科学技术大学信息科学技术学院 合肥 230027)

摘要: 近年来, 基于运动矢量的视频隐写引起了信息隐藏领域研究者的广泛关注。许多视频隐写方法通过合理地对运动矢量定义加性嵌入失真函数获得了良好的性能, 然而这些方法忽略了载体元素之间的相互嵌入影响。该文提出的利用非加性嵌入失真的视频隐写方法为运动矢量设计了可以反映相互嵌入影响的联合嵌入失真, 并通过分解联合失真实现修改概率的转换, 从而动态、合理地在运动矢量的水平分量和垂直分量分配秘密消息。实验结果表明, 与使用加性嵌入失真方法相比, 该方法能获得更好的安全性和率失真性能。

关键词: 信息隐藏; 视频隐写; 运动矢量; 联合嵌入失真; 修改概率

中图分类号: TN918

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2020)10-2357-08

DOI: 10.11999/JEIT200001

Video Steganography Based on Modification Probability Transformation and Non-additive Embedding Distortion

LI Lincong YAO Yuanzhi ZHANG Xiaoya ZHANG Weiming YU Nenghai

(School of Information Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: In recent years, research on motion vector-based video steganography has attracted considerable attention from researchers in the field of information hiding. Many video steganographic methods incorporating motion vector-based additive embedding distortion functions have achieved good performance. However, the mutual embedding impact between cover elements in video steganography is neglected in these additive embedding distortion functions. In this paper, joint distortion which reflects the mutual embedding impact for motion vectors is designed. By decomposing joint embedding distortion, modification probability transformation can be achieved and embedding payloads can be dynamically and reasonably allocated in horizontal components and vertical components of motion vectors. Therefore, the video steganography method using non-additive embedding distortion is proposed. Experimental results demonstrate that the proposed method can enhance the security performance significantly compared with the typical methods using additive embedding distortions and obtain the relatively better video coding quality as well.

Key words: Information hiding; Video steganography; Motion vector; Joint embedding distortion; Modification probability

1 引言

隐写术主要研究如何在数字媒体(如图像^[1]、音

频^[2]、视频^[3]等)中隐藏秘密消息从而进行隐蔽通信。随着视频在互联网中的普及和5G移动互联网的逐渐推广, 将视频作为隐写术的载体有利于消息的快速传播。与图像和音频相比, 视频包含更充足的信息和更复杂的编码模式, 因此视频是隐写术的理想载体。视频压缩编码过程中的许多模块都可以作为视频隐写的载体, 本文研究基于运动矢量的H.264视频隐写。

早期的基于运动矢量的视频隐写通过较为简单的筛选规则或传统的隐写码实现。Xu等人^[4]认为幅值较大的运动矢量适合被修改。Aly^[5]在实验中发现, 不应将运动矢量幅值作为筛选载体的标准, 而

收稿日期: 2020-01-02; 改回日期: 2020-08-04; 网络出版: 2020-08-12

*通信作者: 姚远志 yaoyz@ustc.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61802357, U1636201), 国家重点研发计划项目(2018YFB0804102), 中央高校基本科研业务费专项资金(WK3480000009)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61802357, U1636201), The National Key Research and Development Program of China (2018YFB0804102), The Fundamental Research Funds for the Central Universities (WK3480000009)

应该在预测误差较大的宏块对应的运动矢量嵌入消息。Cao等人^[6]设计了两级失真函数并使用湿纸编码^[7]将消息嵌入运动矢量。以上方法在筛选载体时比较主观,且没有运用强大的隐写编码方法,因此无法取得很好的安全性。

近年来,学者们将校验网格编码(Syndrome Trellis Codes, STC)^[8]运用到视频隐写,提出了自适应视频隐写方法。在成熟的编码技术的基础上,隐写术的关键问题是如何合理地定义反映嵌入影响的失真函数。Yao等人^[9]提出了考虑运动矢量的空域统计分布变化(Statistical Distribution Change, SDC)和预测误差变化(Prediction Error Change, PEC)的失真函数。Zhang等人^[10]发现部分修改运动矢量仍满足局部最优性,并据此设计了失真函数。Zhu等人^[11]利用运动矢量的统计分布、局部最优性和重构视频质量设计了失真函数。

另一方面,隐写分析的目标是检测数字媒体中是否隐藏秘密消息。隐写与隐写分析的关系如同矛和盾,因此保持隐写分析者设计的特征可以有效地降低被隐写分析方法检测的概率。Su等人^[12]利用运动矢量差分直方图的中心矩构造了12维的特征。Cao等人^[13]利用被修改的运动矢量在重压缩的过程中具有向原始运动矢量复原趋势的现象构造了15维的特征。Wang等人^[14]基于修改运动矢量会破坏绝对差值和(Sum of Absolute Difference, SAD)的局部最优性的假设设计了18维的特征。Zhang等人^[15]通过估计失真和编码运动矢量所需的比特数并计算拉格朗日代价来衡量局部最优性,最终设计了36维的隐写分析特征。

尽管现有的自适应视频隐写方法已经取得良好性能,这些方法采用的都是加性失真最小化模型。最近的研究表明,非加性嵌入失真模型在图像隐写术中取得了很好的效果。在失真更新策略方面,Li等人^[16]提出了针对空域灰度图像隐写的方向聚集原则;汤光明等人^[17]提出了针对彩色分量的失真更新策略,用于彩色图像隐写;Li等人^[18]针对JPEG (Joint Photographic Experts Group)隐写提出了块边界连续性原则。在非加性嵌入失真编码方面,Zhang等人^[19]提出将部分具有相关性的载体元素作

为整体考虑并定义联合失真,再使用联合失真分解编码方法嵌入消息以减小计算复杂度。他们还通过实验证明这种编码方法能在空域图像隐写中取得很好的效果。运动矢量间存在空域相关性^[20],其分量间存在耦合性,因此在视频隐写中应该考虑动态失真。然而,根据广泛的调研,目前还没有公开文献讨论基于非加性嵌入失真的视频隐写方法。

本文针对运动矢量设计了反映嵌入影响的联合失真函数,然后将联合失真分解为水平分量和垂直分量的加性失真,从而使用双层STC高效地将秘密消息嵌入视频,实现从失真空间到概率空间的合理转化。最后,通过实验对本文提出的基于修改概率转换和非加性嵌入失真的视频隐写方法的性能进行了验证。

2 系统框架

在自适应隐写框架中,记固定的载体序列为 $\mathbf{x} = (x_1 x_2 \cdots x_n)$,对 x_i 的修改是相互独立的。将 $\mathbf{x}$ 修改为载密序列 $\mathbf{y} = (y_1 y_2 \cdots y_n)$ 引入的失真可以表示为 $D(\mathbf{y}) = D(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \sum_{i=1}^n \rho_i(x_i, y_i)$,其中 $\rho_i(x_i, y_i)$ 是将第 i 个载体元素 x_i 修改为 y_i ($y_i \in I_i = \{x_i - 1, x_i, x_i + 1\}, i = 1, 2, \cdots, n$)引起的失真。为保证隐写的安全性,使用双层STC实现 ± 1 嵌入。然而,基于运动矢量的视频隐写的载体是2维的矢量,因此目标是最小化所有运动矢量的加性失真和。一个 N 帧的压缩域视频的所有运动矢量的加性失真和可以表示成

$$D = \sum_{t=1}^N D(\mathbf{MV}_t, \mathbf{MV}'_t) = \sum_{t=1}^N \sum_{i=1}^H \sum_{j=1}^W \rho_{i,j,t}(\mathbf{mv}_{i,j,t}, \mathbf{mv}'_{i,j,t}) \quad (1)$$

其中, $\mathbf{MV}_t$ 是载体视频第 t 帧的运动矢量场; $\mathbf{MV}'_t$ 是相应载密视频的运动矢量场; H 和 W 分别是以宏块为单位计算得到的每帧的高和宽; $\mathbf{mv}_{i,j,t}$ 是第 t 帧的第 (i, j) 个原始运动矢量; $\mathbf{mv}'_{i,j,t}$ 是相应的修改运动矢量; $0 \leq \rho_{i,j,t}(\mathbf{mv}_{i,j,t}, \mathbf{mv}'_{i,j,t}) \leq \infty$ 是表达第 t 帧的第 (i, j) 个运动矢量被修改造成的影响的联合失真函数;修改运动矢量 $\mathbf{mv}'_{i,j,t}$ 选自包含9种修改状态的候选修改运动矢量集 $\mathbf{CMV}_{i,j,t}$,即

$$\mathbf{mv}'_{i,j,t} \in \mathbf{CMV}_{i,j,t} = \{(\mathbf{mv}_{i,j,t-1} \ \mathbf{mv}_{i,j,t-1}), (\mathbf{mv}_{i,j,t-1} \ \mathbf{mv}_{i,j,t}), (\mathbf{mv}_{i,j,t-1} \ \mathbf{mv}_{i,j,t+1}), (\mathbf{mv}_{i,j,t} \ \mathbf{mv}_{i,j,t-1}), (\mathbf{mv}_{i,j,t} \ \mathbf{mv}_{i,j,t}), (\mathbf{mv}_{i,j,t} \ \mathbf{mv}_{i,j,t+1}), (\mathbf{mv}_{i,j,t+1} \ \mathbf{mv}_{i,j,t-1}), (\mathbf{mv}_{i,j,t+1} \ \mathbf{mv}_{i,j,t}), (\mathbf{mv}_{i,j,t+1} \ \mathbf{mv}_{i,j,t+1})\} \quad (2)$$

设将 $\mathbf{mv}_{i,j,t}$ 修改为 $\mathbf{mv}'_{i,j,t}$ 的概率为 $\pi(\mathbf{mv}'_{i,j,t})$,则发送方能以平均失真 $E_\pi(D)$ 发送 $H(\pi)$ 比特消息,其中,

$$H(\pi) = - \sum_{\mathbf{mv}'_{i,j,t}} \pi(\mathbf{mv}'_{i,j,t}) \lg \pi(\mathbf{mv}'_{i,j,t}) \quad (3)$$

$$E_{\pi}(D) = \sum_{\mathbf{mv}'_{i,j,t}} \pi(\mathbf{mv}'_{i,j,t}) \rho_{i,j,t}(\mathbf{mv}_{i,j,t}, \mathbf{mv}'_{i,j,t}) \quad (4)$$

对于限载荷发送方(Payload Limited Sender, PLS), 最小化嵌入失真可以归结为优化问题式(5)

$$\min_{\pi} E_{\pi}(D), \text{ s.t. } H(\pi) = m \quad (5)$$

根据最大熵原理, 优化问题式(5)的最优解具有吉布斯分布(Gibbs distribution)^[21]的形式, 如式(6),

$$\begin{aligned} \pi_{\lambda}(\mathbf{mv}'_{i,j,t}) &= \frac{\exp(-\lambda \rho_{i,j,t}(\mathbf{mv}_{i,j,t}, \mathbf{mv}'_{i,j,t}))}{\sum_{\mathbf{mv}'_{i,j,t} \in \text{CMV}_{i,j,t}} \exp(-\lambda \rho_{i,j,t}(\mathbf{mv}_{i,j,t}, \mathbf{mv}'_{i,j,t}))} \end{aligned} \quad (6)$$

其中, 参数 λ 可以由优化问题式(5)的约束条件求得。

每个候选修改运动矢量都存在与之对应的修改概率。候选修改运动矢量水平分量的边缘修改概率为

$$\begin{aligned} \pi_{i,j,t}^{(x)}(\delta_1) &= \sum_{\delta_2=-1}^1 \pi(\mathbf{mv}'_{i,j,t} = (\text{mvx}_{i,j,t} + \delta_1, \text{mvy}_{i,j,t} + \delta_2)) \end{aligned} \quad (7)$$

其中, $\delta_1 \in \{-1, 0, 1\}$ 。根据式(6)和式(7)可以得到, 水平分量的边缘嵌入失真为

$$\rho_{i,j,t}^{(x)}(\text{mvx}_{i,j,t} + \delta_1) = \begin{cases} -\frac{1}{\lambda} \ln \frac{\pi_{i,j,t}^{(x)}(-1)}{\pi_{i,j,t}^{(x)}(0)}, & \delta_1 = -1 \\ 0, & \delta_1 = 0 \\ -d \frac{1}{\lambda} \ln \frac{\pi_{i,j,t}^{(x)}(1)}{\pi_{i,j,t}^{(x)}(0)}, & \delta_1 = 1 \end{cases} \quad (8)$$

得到水平分量的边缘嵌入失真后, 利用双层STC将 $H(\pi^{(x)})$ 比特的秘密消息嵌入运动矢量的水平分量。之后, 根据水平分量的修改情况计算垂直分量的条件修改概率

$$\pi_{i,j,t}^{(y)}(\delta_2|\delta_1) = \frac{\pi(\mathbf{mv}'_{i,j,t} = (\text{mvx}_{i,j,t} + \delta_1, \text{mvy}_{i,j,t} + \delta_2))}{\pi_{i,j,t}^{(x)}(\delta_1)} \quad (9)$$

其中, δ_1 已由将秘密消息嵌入水平分量的过程确定, $\delta_2 \in \{-1, 0, 1\}$ 。类似地, 垂直分量的条件嵌入失真为

$$\rho_{i,j,t}^{(y)}(\text{mvy}_{i,j,t} + \delta_2|\delta_1) = \begin{cases} -\frac{1}{\lambda} \ln \frac{\pi_{i,j,t}^{(y)}(-1|\delta_1)}{\pi_{i,j,t}^{(y)}(0|\delta_1)}, & \delta_2 = -1 \\ 0, & \delta_2 = 0 \\ -\frac{1}{\lambda} \ln \frac{\pi_{i,j,t}^{(y)}(1|\delta_1)}{\pi_{i,j,t}^{(y)}(0|\delta_1)}, & \delta_2 = 1 \end{cases} \quad (10)$$

将 $H(\pi^{(y)})$ 比特消息嵌入垂直分量。注意到, $H(\pi^{(x)}) + H(\pi^{(y)}) = H(\pi)$, 其中 $H(\pi)$ 是消息的总比特数。

本文提出的针对运动矢量的联合嵌入失真分解编码方法通过将运动矢量的修改概率转换为水平分量的边缘修改概率和垂直分量的条件修改概率, 构造针对运动矢量水平分量和垂直分量的非加性失真, 即 $\rho(\mathbf{mv}, \mathbf{mv}') \neq \rho^{(x)}(\text{mvx} + \delta_1) + \rho^{(y)}(\text{mvy} + \delta_2|\delta_1)$ 。这种方法充分考虑了运动矢量的分量耦合性, 有助于提升视频隐写的抗检测性能。

3 失真函数定义

在第2节提到的失真函数 $\rho_{i,j,t}(\mathbf{mv}_{i,j,t}, \mathbf{mv}'_{i,j,t})$ 可以表示为

$$\rho_{i,j,t}(\mathbf{mv}_{i,j,t}, \mathbf{mv}'_{i,j,t}) = \text{SDC}_{i,j,t} \cdot (\text{PEC}_{i,j,t} + \alpha)^{\beta} \quad (11)$$

其中, α 取1以保证PEC为0时失真仍为正实数, β 用于调节SDC和PEC对失真的影响。

令 $\mathbf{mv}'_{i,j,t} \mathbf{MVX}_{\sim i,j,t}$ 和 $\mathbf{mv}'_{i,j,t} \mathbf{MVY}_{\sim i,j,t}$ 分别表示第 t 帧中 (i, j) 位置处运动矢量 $\mathbf{mv}_{i,j,t}$ 修改为 $\mathbf{mv}'_{i,j,t}$ 后的水平分量矩阵和垂直分量矩阵, $\text{SDC}_{i,j,t}$ 是运动矢量统计分布变化, 可以表示为

$$\begin{aligned} \text{SDC}_{i,j,t} &= \sum_{\substack{p, q \in \{-128, \dots, 128\} \\ d \in \{\rightarrow, \nearrow, \uparrow, \nwarrow, \bullet\}}} \omega_{p,q} [|A_{p,q}^d(\mathbf{MVX}_t) - A_{p,q}^d(\mathbf{mv}'_{i,j,t} \mathbf{MVX}_{\sim i,j,t})| \\ &\quad + |A_{p,q}^d(\mathbf{MVY}_t) - A_{p,q}^d(\mathbf{mv}'_{i,j,t} \mathbf{MVY}_{\sim i,j,t})|] \end{aligned} \quad (12)$$

其中, $\omega_{p,q} = (1 + \sqrt{p^2 + q^2})^{-1}$, $A_{p,q}^d(\bullet)$ 是对矩阵使用差分算子计算得到的2阶共生矩阵对应的和函数, “ $\rightarrow$ ” “ $\nearrow$ ” “ $\uparrow$ ” “ $\nwarrow$ ” 分别表示差分计算方向从左至右、从左下至右上、从下至上、从右下至左上, “ $\bullet$ ”表示相邻帧中与当前帧、当前宏块相同位置的宏块。以运动矢量水平分量从左至右“ $\rightarrow$ ”计算差分为例,

$$A_{p,q}^{\rightarrow}(\mathbf{MVX}_t) = \sum_{i=1}^H \sum_{j=1}^{W-1} [\text{dx}_{i,j,t}^{\rightarrow} = p, \text{dx}_{i,j+1,t}^{\rightarrow} = q] \quad (13)$$

其中, $\text{dx}_{i,j,t}^{\rightarrow} = \text{mvx}_{i,j,t} - \text{mvx}_{i,j+1,t}$, 函数 $[I]$ 是示性函数, 即在逻辑表达式 I 为真时函数值为1, 否则为0。

$\text{PEC}_{i,j,t}$ 是第 t 帧中 (i, j) 位置处运动矢量 $\mathbf{mv}_{i,j,t}$ 修改为 $\mathbf{mv}'_{i,j,t}$ 后的预测误差变化, 可以表示为

$$\text{PEC}_{i,j,t} = |e_{i,j,t}(\mathbf{mv}_{i,j,t}) - e_{i,j,t}(\mathbf{mv}'_{i,j,t})| \quad (14)$$

其中, $e_{i,j,t}(\mathbf{mv}_{i,j,t})$ 是运动矢量 $\mathbf{mv}_{i,j,t}$ 的预测误差, $e_{i,j,t}(\mathbf{mv}'_{i,j,t})$ 是运动矢量 $\mathbf{mv}'_{i,j,t}$ 的预测误差。

4 隐写方法实现

本节在针对运动矢量的联合嵌入失真分解编码方法的基础上实现了一种自适应视频隐写方法,它包含3个步骤:定义失真、嵌入消息和编码视频。得到载密视频后,接收方也可以顺利地提取秘密消息。假设原始视频共有 N 帧,以下详细地描述定义失真、嵌入消息、编码视频和提取消息的流程。

定义失真:先对原始视频进行运动估计。在每个P帧中,记运动估计得到的原始运动矢量场为 $\mathbf{MV}_t$,相应的预测误差矩阵为 $\mathbf{E}_t$,根据式(11)计算该帧每个宏块的失真 $\rho_{i,j,t}(\mathbf{mv}_{i,j,t}, \mathbf{mv}'_{i,j,t})$,记录失真矩阵 $\mathbf{D}_t$ 。

嵌入消息:假定视频中P帧的数量为 N_P ,秘密消息 $\mathbf{m}$ 的长度为 m 。首先计算载体的长度 $n = H \times W \times N_P$ 和嵌入率 $r = m/n$,嵌入率用每个运动矢量嵌入的比特数(bit per motion vector, bpmv)来衡量。分别将所有P帧的运动矢量场 $\mathbf{MV}_t$ 和失真矩阵 $\mathbf{D}_t$ 整合到一起,根据式(6)计算运动矢量的联合修改概率。分别根据式(7)和式(8)计算水平分量的边缘修改概率和边缘嵌入失真,再用双层STC在水平分量嵌入消息;根据水平分量的修改情况,分别按照式(9)和式(10)计算垂直分量的条件修改概率和条件嵌入失真,利用双层STC在垂直分量嵌入消息。至此,得到了修改的运动矢量场 $\mathbf{MV}'_t$ 。

编码视频:使用修改的运动矢量完成后续编码过程,即用修改的运动矢量对所有宏块进行运动补偿和残差计算,并编码得到视频比特流。

提取消息:接收方收到载密视频后,先从中提取所有P帧的运动矢量并整合到一起,分别对水平分量矩阵和垂直分量矩阵使用STC解码,并将解码得到的两段消息拼接起来,这样就完成了消息的提取过程。

5 实验结果与分析

5.1 实验设置

测试视频库由15个4:2:0采样、CIF格式的标准YUV视频序列(Bus, City, Coastguard, Crew, Flower, Football, Foreman, Harbour, Ice, Mobile, Paris, Soccer, Stefan, Tempete, Waterfall)构建。为了得到丰富的视频载体,将这些视频序列分割成75个不重叠的子序列,每个子序列的长度是60帧。

为验证本文提出的视频隐写方法的性能,选取其他4种基于运动矢量的视频隐写方法进行对比,分别是文献[4]方法、文献[5]方法、文献[6]方法和文献[9]方法。将5种隐写方法集成到了联合视频专家组(Joint Video Team, JVT)所认可的参考软件JM 10.2中,量化参数设为28。对每种隐写方法,

分别以0.1bpmv, 0.2bpmv, 0.3bpmv, 0.4bpmv和0.5bpmv的嵌入率嵌入随机生成的秘密消息。本文提出的失真函数是有界的,因为过多的“湿点”会导致无法用STC嵌入。然而文献[9]方法使用的失真函数将幅值为0的运动矢量定义成“湿点”。为了顺利地嵌入消息和公平地进行对比,将文献[9]方法的失真函数修改为

$$\rho_{i,j,t}(\mathbf{mv}_{i,j,t}, \mathbf{mv}'_{i,j,t}) = \begin{cases} \text{SDC}_{i,j,t} \times (\text{PEC}_{i,j,t} + \alpha)^\beta, & \mathbf{mv}_{i,j,t} \neq 0 \\ \max_{\mathbf{mv}_{i,j,t} \neq 0} \{\rho_{i,j,t}\} + 1, & \text{其它} \end{cases} \quad (15)$$

为了衡量5种隐写方法的安全性能,选取了3种有代表性的隐写分析方法来检测,分别是文献[12]方法(记为S1)、文献[13]方法(记为S2)和文献[14]方法(记为S3)。在提取特征时,用长度为6的滑动窗不重叠地对视频扫描,并在窗内提取特征。将载体、载密视频库平均地分为训练集与测试集,使用集成分类器^[22]进行测试和分类。以式(16)所示的最小平均误分类概率 P_E 来衡量隐写方法的抗检测性能,

$$P_E = \min_{P_{FA}} \frac{P_{FA} + P_{MD}(P_{FA})}{2} \quad (16)$$

其中, P_{FA} 和 P_{MD} 分别是虚警概率和漏检概率。最小平均误分类概率 P_E 越大,隐写方法的抗检测性越强。

5.2 失真函数参数选取

由于SDC和PEC的量纲不统一,难以用理论分析它们对失真的影响,因而在失真函数中用参数 β 进行调节。具体的方法是, β 分别取0, 0.1, 0.2, ..., 1.0,以0.2bpmv和0.3bpmv嵌入率进行隐写,选取隐写分析方法S1和S2进行检测,检测结果如图1(a)。为了获得更好的综合性能,选取 $\beta=0.2$ 来进行后续的实验。类似地,在文献[9]方法的失真函数中, β 选为0.3。

5.3 实验结果

5.3.1 抗检测性能

表1给出了5种嵌入率下文献[4],文献[5],文献[6],文献[9]和本文算法抵抗3种隐写分析方法的最小平均误分类概率。可以看出,本文提出的基于修改概率转换和非加性嵌入失真的视频隐写方法在抗检测性能方面优于其他4种隐写方法。为了更直观地分析,将5种隐写方法抵抗S1, S2和S3的结果绘制成折线图,分别如图2(a),图2(b)和图2(c)。

S1, S2和S3分别从不同的角度来提取特征。S1根据运动矢量分量差分直方图的中心矩提取特征, S2根据运动矢量在重压缩过程中的复原现象提取特征。文献[4]和文献[5]方法都没有采用隐写编码,筛选载体的依据主观、单一,因此性能较差。

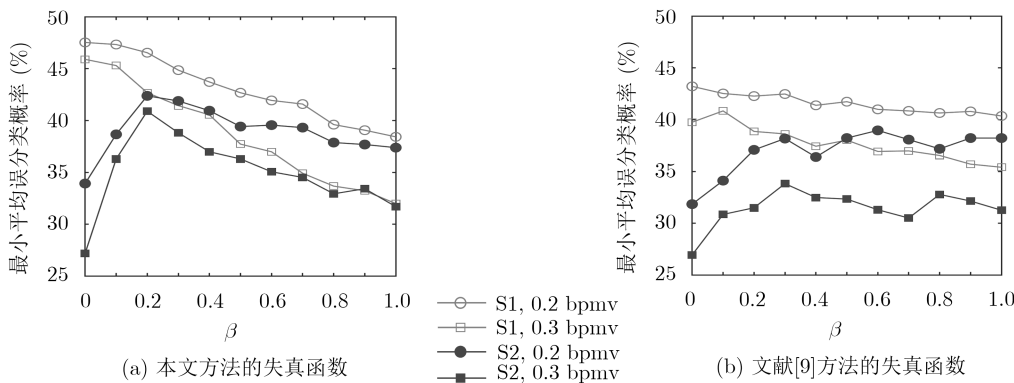


图 1 本文和文献[9]的方法的失真函数选定不同参数时抵抗隐写分析方法S1和S2的性能

表 1 5种嵌入率下5种隐写方法抵抗3种隐写分析方法的最小平均误分类概率(%)

嵌入率(bpmv)	文献[4]方法			文献[5]方法			文献[6]方法			文献[9]方法			本文方法		
	S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2	S3
0.1	46.54	37.19	17.56	46.29	16.02	16.12	40.36	40.95	17.26	45.55	41.10	21.02	48.71	42.14	21.51
0.2	41.69	26.01	11.82	39.86	8.36	11.77	32.00	37.29	13.85	42.68	37.78	14.94	46.54	41.30	16.96
0.3	37.29	23.54	9.50	34.08	6.08	9.74	26.21	33.88	12.41	38.38	34.03	12.71	42.98	41.20	15.68
0.4	34.52	17.11	5.93	26.16	4.55	6.73	17.16	28.04	9.79	34.32	25.82	10.04	40.06	36.84	15.18
0.5	31.75	13.95	4.95	22.26	3.07	5.64	12.31	24.13	7.96	31.95	21.17	7.81	37.24	34.82	12.81

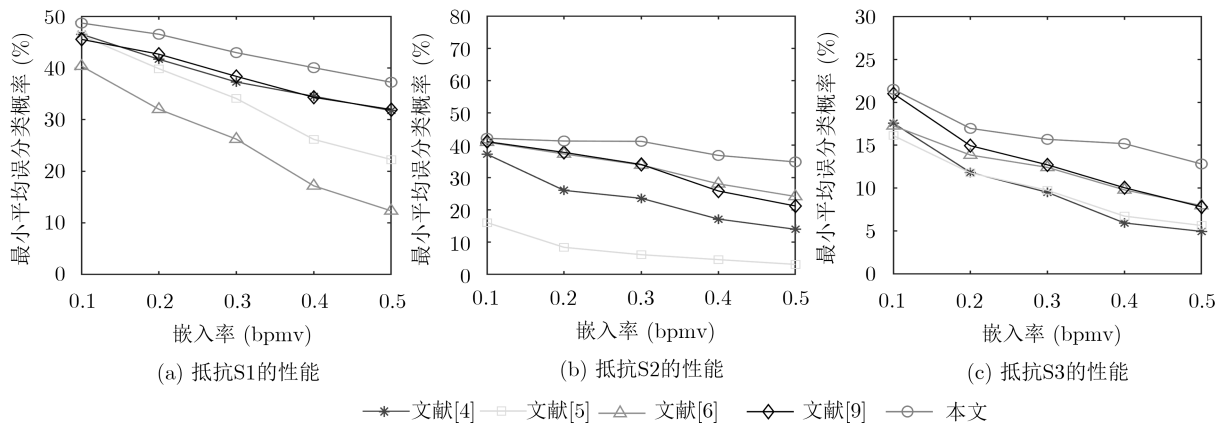


图 2 5种隐写方法抵抗3种隐写分析方法的性能

文献[6]的方法使用了湿纸编码，定义失真时只考虑了预测误差的因素，因此其对抗S2的性能较好，但对抗S1的性能较差。尽管文献[9]的方法使用了自适应隐写框架，且定义失真时也考虑了SDC和PEC这两个因素，但是没有考虑到载体元素之间的相互嵌入影响，因此性能不如本文方法。S3根据SAD的局部最优性提取特征。5种隐写方法都没有考虑到局部最优性，本文方法仍然优于其他4种方法，它相对文献[9]方法的优势充分说明了联合嵌入失真分解编码的优越性。

如果一种隐写方法能够被某种隐写分析方法以较高的准确率检测，那么这种隐写方法就是失败的。因此，我们引进综合最小平均误分类概率，即

一种隐写方法在被几种不同的隐写分析方法检测时最小平均误分类概率的最小值，来衡量隐写方法的综合抗检测性能。将5种隐写方法抵抗S1, S2和S3的综合最小平均误分类概率绘制成折线图，如图3。本文提出的隐写方法的综合抗检测性能优于其他4种隐写方法。

5.3.2 率失真性能

视频隐写破坏了运动估计的最优性，必然降低视频质量和压缩效率。视频质量下降和比特率扩张也会降低视频隐写的不可感知性。因此有必要考虑视频隐写方法的率失真性能。

使用峰值信噪比(Peak Signal-to-Noise Ratio, PSNR)来衡量载密视频的质量。表2给出了嵌入率

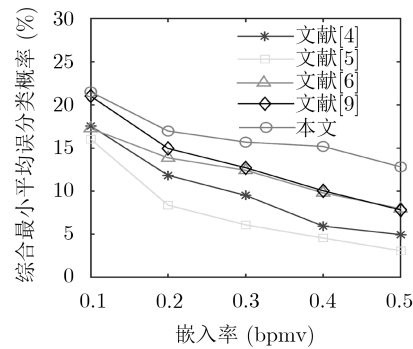


图 3 5种隐写方法抵抗3种隐写分析方法的综合性能

为0.5bpmv时5种隐写方法得到的载密视频亮度分量的平均PSNR。由于在用修改的运动矢量完成视频编码的过程中重新计算残差，基于运动矢量的视频隐写方法几乎不会造成视频质量的下降。本文方法得到载密视频的质量高于其他4种方法。

嵌入消息的过程修改了原始运动矢量，破坏了预测精度，很可能会造成拉格朗日代价的提高，因而编码载密视频需要的比特数比载体视频多，即造成视频比特率扩张。比特率扩张的多少不但反映隐写方法的率失真性能，而且会影响通信效率。表3

表 2 嵌入率为0.5bpmv时5种隐写方法得到的载密视频亮度分量的平均PSNR (dB)

视频序列	载体视频	文献[4]方法	文献[5]方法	文献[6]方法	文献[9]方法	本文方法
Bus	34.425	34.185	34.235	34.265	34.270	34.295
City	34.676	34.412	34.432	34.464	34.472	34.494
Coastguard	34.410	34.212	34.234	34.256	34.262	34.286
Crew	36.948	36.798	36.790	36.816	36.814	36.844
Flower	34.520	34.270	34.362	34.440	34.425	34.460
Football	35.938	35.842	35.848	35.838	35.845	35.860
Foreman	36.080	35.814	35.794	35.868	35.876	35.900
Harbour	34.046	33.864	33.854	33.898	33.892	33.924
Ice	39.558	39.282	39.270	39.382	39.380	39.405
Mobile	33.616	33.454	33.430	33.506	33.494	33.524
Paris	33.518	35.375	35.243	35.436	35.401	35.450
Soccer	35.664	35.496	35.504	35.504	35.518	35.548
Stefan	35.340	35.070	35.030	35.210	35.190	35.240
Tempete	34.520	34.358	34.320	34.388	34.392	34.418
Waterfall	34.688	34.250	34.338	34.360	34.388	34.405

表 3 嵌入率为0.5bpmv时5种隐写方法得到载密视频的平均比特率扩张(%)

视频序列	文献[4]方法	文献[5]方法	文献[6]方法	文献[9]方法	本文方法
Bus	12.81	14.03	3.48	5.77	3.39
City	22.92	20.47	9.02	10.34	7.01
Coastguard	6.78	9.72	3.92	4.64	2.94
Crew	3.99	4.95	3.10	3.15	1.95
Flower	14.87	15.26	2.93	5.14	1.74
Football	2.15	3.27	1.84	2.17	1.23
Foreman	11.92	18.45	5.97	6.52	4.63
Harbour	6.97	7.34	3.15	4.13	2.72
Ice	16.05	18.03	4.71	6.53	4.17
Mobile	9.95	13.10	3.49	5.64	3.00
Paris	10.44	19.15	2.51	6.59	2.46
Soccer	5.34	7.78	3.98	4.57	2.98
Stefan	13.95	14.89	3.63	5.13	2.39
Tempete	8.89	12.93	3.84	4.39	2.71
Waterfall	18.78	20.20	9.11	8.73	6.70

给出了嵌入率为0.5bpmv时5种隐写方法得到载密视频的平均比特率扩张。本文方法保证了较小的比特率扩张。

5.3.3 计算复杂度

本文提出的隐写方法包含3个步骤，即定义失真、嵌入消息和编码视频。因为文献[9]方法和本文方法都使用了自适应隐写框架，我们测试了这两种方法在所有子序列的嵌入消息和编码视频步骤花费的时间。嵌入速率对执行时间影响很小，因此只测试了嵌入率为0.1 bpmv时的情况，测试使用的硬件为Intel(R) CoreTM i7-4710MQ CPU @ 2.50 GHz。表4给出了两种方法在嵌入消息和编码视频步骤的平均执行时间。与使用加性嵌入失真的视频隐写方法相比，本文方法几乎不会增加计算复杂度。

表4 文献[9]方法和本文方法在嵌入消息和编码视频步骤的平均执行时间(s)

隐写方法	嵌入消息	编码视频	总计
文献[9]方法	3.39	92.26	95.65
本文方法	3.38	92.66	96.04

6 结束语

本文提出了一种基于修改概率转换和非加性嵌入失真的视频隐写方法，核心思想是合理地对运动矢量定义联合失真，并使用联合嵌入失真分解编码方法完成修改概率的转换，将消息嵌入表达为以修改概率为依据的载荷分配问题，实现了非加性嵌入失真编码。实验表明，与现有的使用加性失真的视频隐写方法相比，本文提出的方法可以获得更好的抗检测性能和率失真性能。本文也为后续基于非加性嵌入失真的视频隐写研究提供有意义的借鉴。

参考文献

- [1] HUSSAIN M, WAHAB A W A, IDRIS Y I B, *et al.* Image steganography in spatial domain: A survey[J]. *Signal Processing: Image Communication*, 2018, 65: 46–66. doi: 10.1016/j.image.2018.03.012.
- [2] 吴志军, 李常亮, 李荣. 基于随机位置选择和矩阵编码的语音信息隐藏方法[J]. *电子与信息学报*, 2020, 42(2): 355–363. doi: 10.11999/JEIT181163.
- [3] LIU Yunxia, LIU Shuyang, WANG Yonghao, *et al.* Video steganography: A review[J]. *Neurocomputing*, 2019, 335: 238–250. doi: 10.1016/j.neucom.2018.09.091.
- [4] XU Changyong, PING Xijian, and ZHANG Tao. Steganography in compressed video stream[C]. The 1st International Conference on Innovative Computing, Information and Control-Volume I (ICICIC'06), Beijing, China, 2006: 269–272. doi: 10.1109/ICICIC.2006.158.
- [5] ALY H A. Data hiding in motion vectors of compressed video based on their associated prediction error[J]. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2011, 6(1): 14–18. doi: 10.1109/TIFS.2010.2090520.
- [6] CAO Yun, ZHAO Xianfeng, FENG Dengguo, *et al.* Video steganography with perturbed motion estimation[C]. The 13th International Conference on Information Hiding, Prague, Czech Republic, 2011: 193–207. doi: 10.1007/978-3-642-24178-9_14.
- [7] FRIDRICH J, GOLJAN M, LISONEK P, *et al.* Writing on wet paper[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2005, 53(10): 3923–3935. doi: 10.1109/TSP.2005.855393.
- [8] FILLER T, JUDAS J, and FRIDRICH J. Minimizing additive distortion in steganography using syndrome-trellis codes[J]. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2011, 6(3): 920–935. doi: 10.1109/TIFS.2011.2134094.
- [9] YAO Yuanzhi, ZHANG Weiming, YU Nenghai, *et al.* Defining embedding distortion for motion vector-based video steganography[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2015, 74(24): 11163–11186. doi: 10.1007/s11042-014-2223-8.
- [10] ZHANG Hong, CAO Yun, and ZHAO Xianfeng. Motion vector-based video steganography with preserved local optimality[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2016, 75(21): 13503–13519. doi: 10.1007/s11042-015-2743-x.
- [11] ZHU Baolin and NI Jiangqun. Uniform embedding for efficient steganography of H. 264 video[C]. The 25th IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), Athens, Greece, 2018: 1678–1682. doi: 10.1109/ICIP.2018.8451214.
- [12] SU Yuting, ZHANG Chengqian, and ZHANG Chuntian. A video steganalytic algorithm against motion-vector-based steganography[J]. *Signal Processing*, 2011, 91(8): 1901–1909. doi: 10.1016/j.sigpro.2011.02.012.
- [13] CAO Yun, ZHAO Xianfeng, and FENG Dengguo. Video steganalysis exploiting motion vector reversion-based features[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2012, 19(1): 35–38. doi: 10.1109/LSP.2011.2176116.
- [14] WANG Keren, ZHAO Hong, and WANG Hongxia. Video steganalysis against motion vector-based steganography by adding or subtracting one motion vector value[J]. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2014, 9(5): 741–751. doi: 10.1109/TIFS.2014.2308633.

- [15] ZHANG Hong, CAO Yun, and ZHAO Xianfeng. A steganalytic approach to detect motion vector modification using near-perfect estimation for local optimality[J]. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2017, 12(2): 465–478. doi: 10.1109/TIFS.2016.2623587.
- [16] LI Bin, WANG Ming, LI Xiaolong, *et al.* A strategy of clustering modification directions in spatial image steganography[J]. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2015, 10(9): 1905–1917. doi: 10.1109/TIFS.2015.2434600.
- [17] 汤光明, 姜明明, 孙艺. 失真代价动态更新的自适应彩色图像隐写算法[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(3): 656–665. doi: 10.11999/JEIT180388.
- TANG Guangming, JIANG Mingming, and SUN Yi. Adaptive color image steganography based on dynamic distortion modification[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(3): 656–665. doi: 10.11999/JEIT180388.
- [18] LI Weixiang, ZHANG Weiming, CHEN Kejiang, *et al.* Defining joint distortion for JPEG steganography[C]. The 6th ACM Workshop on Information Hiding and Multimedia Security, Innsbruck, Austria, 2018: 5–16. doi: 10.1145/3206004.3206008.
- [19] ZHANG Weiming, ZHANG Zhuo, ZHANG Lili, *et al.* Decomposing joint distortion for adaptive steganography[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2017, 27(10): 2274–2280. doi: 10.1109/TCSVT.2016.2587388.
- [20] 周洋, 吴佳忆, 陆宇, 等. 面向三维高效视频编码的深度图错误隐藏[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(11): 2760–2767. doi: 10.11999/JEIT180926.
- ZHOU Yang, WU Jiayi, LU Yu, *et al.* Depth map error concealment for 3D high efficiency video coding[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(11): 2760–2767. doi: 10.11999/JEIT180926.
- [21] FILLER T and FRIDRICH J. Gibbs construction in steganography[J]. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2010, 5(4): 705–720. doi: 10.1109/TIFS.2010.2077629.
- [22] KODOVSKY J, FRIDRICH J, and HOLUB V. Ensemble classifiers for steganalysis of digital media[J]. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2012, 7(2): 432–444. doi: 10.1109/TIFS.2011.2175919.
- 李林聪: 男, 1996年生, 博士生, 研究方向为信息隐藏、深度学习.
- 姚远志: 男, 1989年生, 副研究员, 研究方向为信息隐藏、视频编码.
- 张晓雅: 女, 1998年生, 硕士生, 研究方向为信息隐藏、计算机视觉.
- 张卫明: 男, 1976年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为信息隐藏、多媒体安全、隐私保护.
- 俞能海: 男, 1964年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为图像视频处理与分析、计算机视觉与模式识别、信息隐藏与媒体内容安全、信息检索与数据挖掘.

责任编辑: 陈 倩