

基于时空相关性的视频隐写分析

徐长勇, 平西建

(解放军信息工程大学信息工程学院, 郑州 450002)

摘要: 视频中的扩频嵌入是一种典型的隐写方法,能够抵抗视频压缩、噪声添加等多种攻击。为了有效检测利用该方法嵌入的隐藏信息,将隐写过程建模为加性高斯噪声的叠加过程,分析了噪声叠加对视频序列的时间相关性和空间相关性的影响,提出了基于时空相关性的隐写分析算法。该算法利用视频序列中各帧的四方向差分直方图度量隐写对空间相关性的影响,同时利用相邻帧间差分的直方图度量隐写对时间相关性的影响。与现有算法相比,本文算法实现简单,实验结果表明本文算法具有更好的检测性能。

关键词: 视频隐写分析; 扩频隐写; 空间相关性; 时间相关性

中图分类号: TP309 TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-8961(2010)09-1331-07

Video steganalysis based on spatial-temporal correlation

XU Changyong, PING Xijian

(Institute of Information Engineering, PLA Information Engineering University, Zhengzhou 450002)

Abstract: Spread-spectrum embedding for video, which can resist many attacks such as video compression and noise addition, is a representative steganography method. In order to effectively detect the hidden information embedded by the method, the steganography procedure is modeled as the addition of additive Gaussian noise. By analyzing the influence on temporal correlation and spatial correlation of video owing to noise addition, a steganalysis algorithm based on spatial-temporal correlation is proposed. The algorithm uses a difference image histogram of four directions to measure the influence of spatial correlation, and temporal correlation is measured by the histogram of frame difference. Experimental results show the algorithm is easier to implement and better in detection performance than other methods.

Keywords: video steganalysis; spread-spectrum steganography; spatial correlation; temporal correlation

0 引言

信息隐藏是近年来信息安全领域发展迅速的一门交叉学科,其研究在国际上引起了广泛关注。信息隐藏主要包括数字隐写和数字水印两个技术分支,数字水印主要用于电子产品的产权保护,而数字隐写的主要目的是进行隐蔽通信,通过隐藏秘密信息的存在性来获得通信安全。与数字隐写相对抗的技术称做隐写分析,其主要目的是检测被怀疑对象(如图像、视频等)中是否存在隐藏信息,或者进一步地从检测为存在隐藏信息的对象中估计出隐藏容

量、嵌入位置等参数,甚至提取出隐藏信息。一般认为,只要能够揭示被怀疑对象中隐藏信息的存在性,就达到了隐写分析的目的^[1]。所以,目前隐写分析的目的在于检测对象中隐藏信息的存在性,即隐写分析等同于隐藏信息检测。

现阶段的隐写分析研究主要针对静止图像中的数字隐写,如针对 LSB (least significant bit) 替换的 RS (regular and singular) 分析^[2]、SPA (sample pair analysis) 分析^[3]等方法;针对 LSB 匹配嵌入的 Ker 方法^[4]、Lyu 方法^[5]、Huang 方法^[6]等;针对 JPEG 图像隐写, Fridrich 提出了一系列分析方法^[7-8]。与上述针对特定隐写算法的隐写分析不同,还有一类方

基金项目: 国家自然科学基金项目(60473022)。

收稿日期: 2009-03-10; **改回日期:** 2009-05-09

第一作者简介: 徐长勇(1980—),男,2009年获解放军信息工程大学信号与信息处理专业博士学位。主要研究方向为信息隐藏、网络安全等。E-mail: chyong80@163.com。

法不针对具体的嵌入算法,即盲分析^[9]。

视频隐写分析的研究也主要针对特定的隐写算法。针对视频序列中的扩频嵌入,Budhia 等人利用相邻帧的帧平均攻击去除隐藏信息,然后计算待检测视频和攻击后视频各帧之间的差分^[10]。如果待检测帧中存在秘密信息,则差分信号将服从高斯分布,否则不服从高斯分布。该方法根据秘密信息服从高斯分布的先验知识,如果这一先验条件不满足,则该方法将失效。Pankajakshan 等人先使用运动估计得到时间域预测误差,然后进行空域预测得到时空域预测误差,接着将两种预测误差相减,对得到的结果进行三级小波分解,并提取各个子带的小波特征函数的前三阶矩作为特征向量,最后使用 KNN 分类器进行训练和识别,从而实现隐写分析^[11]。与文献[10]方法相比,该方法提高了不是每个像素均嵌入信息情况下的检测性能。Zhang 等人对待检测帧进行 Haar 小波分解,将分解后的低频分量看做载体帧的近似,而高频分量对秘密信息的嵌入比较敏感。计算视频中相邻帧之间的高频分量差分,以差分信号的概率质量函数来检测秘密信息的存在性^[12]。该方法需要进行卷积运算,因此运算量大。

时间相关性和空间相关性是视频序列的基本属性。Pankajakshan 等人的方法虽然一定程度上利用了视频序列的时空相关性,但是没有考虑隐写对时空相关性的影响,也没有对时空相关性进行度量。本文研究发现,即使仅在相邻帧的其中一帧中嵌入信息,相邻帧的时间相关性也会发生变化。在此基础上,结合对空间相关性的分析,本文根据嵌入信息前后视频序列的时空相关性变化,提出了一种有效的隐写分析方法。

1 视频中的扩频隐写

扩展频谱(简称扩频)技术是通信领域中为了提高信息传输可靠性,对窄带信号进行频谱扩展,并在宽带信道中传输的技术。对于信息隐藏,可以将窄带信号(秘密信息)通过宽带信道(图像、视频等)来传输。已有多篇文献探讨了视频中的扩频隐写方法^[13-15],并取得了很好的效果。设视频序列中的一帧为 F ,其高和宽分别为 H, W ,秘密信息序列为 a_j , $a_j \in \{-1, 1\}$,其长度为 L ,即 $1 \leq j \leq L$,扩频隐写嵌入的基本过程如下。

1) 使用扩频系数 cr 对秘密信息序列进行扩

展,得到与视频图像大小相同的序列

$$b_i = a_j, j \cdot cr \leq i < (j + 1) \cdot cr \quad (1)$$

$$i = 1, \dots, H \times W$$

2) 使用二值伪随机序列 p_i , $p_i \in \{-1, 1\}$ 对 b_i 进行调制,并使用幅度系数 α_i 进行调整,得到最终要嵌入的扩频序列为

$$w_i = \alpha_i \cdot b_i \cdot p_i \quad i = 1, \dots, H \times W \quad (2)$$

3) 将载体视频帧逐行扫描,得到 1 维序列 $f_i (1 \leq i \leq H \times W)$,并与扩频序列 w_i 相叠加,即得嵌入了信息的载密视频帧为

$$f'_i = f_i + w_i = f_i + \alpha_i \cdot b_i \cdot p_i \quad i = 1, \dots, H \times W \quad (3)$$

为了保证嵌入信息后的视频质量,通常只在亮度分量中嵌入信息,而不对色度分量进行修改。此外,一般对各帧各像素采用相同的幅度系数 α ,以减少计算复杂度。

提取时,先对载密视频帧进行逐行扫描得到 1 维序列,然后利用一个高通滤波器进行滤波,并将滤波后的序列与伪随机序列 p_i 相乘进行解调,接着把嵌入同一个信息位的解调信号相加,得到相关和,该相关和的符号信息就是嵌入的秘密信息。

为了提高安全性并保证提取的准确性,通常在秘密信息嵌入之前对其进行加密和纠错编码^[16]。加密和纠错编码的引入,在提高准确性的同时降低了隐藏容量,因此扩频隐写以牺牲隐藏容量为代价换取隐写的准确性与安全性。扩频隐写的重要特点在于其具有很强的鲁棒性,在视频压缩、添加噪声等处理后,秘密信息仍能提取出来,所以研究针对扩频隐写的隐写分析具有重要意义。

2 基于时空相关性的隐写分析

针对图像中的扩频隐写,Harmsen 等人利用载体、载密图像直图的特征函数质心为统计特征,设计了适用的检测方法^[17];吴明巧等人提出了基于拉普拉斯模型的分析方法^[18]。这些方法在图像隐写分析方面有较好的效果,但是如果不考虑视频序列的时间相关性,而是直接将其应用于视频隐写分析,往往得不到最优的结果。

为了在载体中隐藏秘密信息,隐写算法总是以一定的规则对其进行修改。根据扩频隐写的基本原理可知,输入图像 $F(x, y)$ 只受到加性噪声 $n(x, y)$ 的干扰。将视频序列看做由一系列的静止图像组成,即将其表示为 $S = \{F_1 F_2 \dots F_N\}$, N 为视频所包含的帧数,

则可将视频中的扩频隐写过程表示成如下形式。

$$\mathbf{G}_i(x, y) = \mathbf{F}_i(x, y) + \mathbf{W}_i(x, y) \quad (4)$$

式中, $i = 1, 2, \dots, N$ 。此时, $\mathbf{W}_i(x, y)$ 为嵌入到各帧中的秘密信息。

对于秘密信息序列, 在使用二值伪随机序列 p_i 调制并使用幅度系数 α_i 调整后, 当 α_i 取相同值时 (实际上, 为了减少计算复杂度, 通常对各帧各像素使用相同的 α), \mathbf{W}_i 将为取值为 α 或 $-\alpha$, 并且 α 或 $-\alpha$ 出现次数大致相等的伪随机噪声序列。因此, 扩频隐写嵌入相当于在载体视频序列的各帧中叠加幅度为 α 或 $-\alpha$ 的随机噪声, 噪声的叠加将对视频序列的时空相关性产生影响, 接下来进行具体分析。

2.1 隐写对空间相关性的影响

对于自然图像而言, 其相邻像素间存在较强的相关性, 这种空间位置相邻的相邻像素间的相关性即为空间相关性。嵌入信息后, 由于噪声的叠加, 相邻像素间的相关性受到了削弱。这里, 利用差分直方图 (DIH) 反映相邻像素间的空间相关性变化, 差分直方图指图像在不同方向上计算相邻像素值之差所得的差分图像的直方图。对于视频序列中的一帧图像 $\mathbf{F}_i (1 \leq i \leq N)$, 图像在水平、垂直、正对角以及反对角方向的差分图像的定义如下:

$$\mathbf{D}_h = \mathbf{F}(1:H, 1:W-1) - \mathbf{F}(1:H, 2:W) \quad (5)$$

$$\mathbf{D}_v = \mathbf{F}(1:H-1, 1:W) - \mathbf{F}(2:H, 1:W) \quad (6)$$

$$\mathbf{D}_{d1} = \mathbf{F}(1:H-1, 1:W-1) - \mathbf{F}(2:H, 2:W) \quad (7)$$

$$\mathbf{D}_{d2} = \mathbf{F}(1:H-1, 2:W) - \mathbf{F}(2:H, 1:W-1) \quad (8)$$

式(5)~(8)中, $\mathbf{F}(1:H, 1:W-1)$ 表示取图像中第1行到第 H 行, 第1列到 $W-1$ 列中的像素, 其余同。设图像的灰度级个数为 m , 则差分图像中差分值的取值区间为 $[-m+1, m-1]$ 。

由定义可知, 差分图像可以反映原图像在某一方向上相邻像素间的相关性。对差分图像统计不同差值的出现次数或者不同差值的出现次数与差值总数的比值, 即可得到差分直方图。

对于多个测试序列, 以幅度系数 $\alpha = 1$ 嵌入信息, 并分析嵌入信息后各帧的差分直方图变化。可以发现, 嵌入信息前后的四方向差分直方图存在明显区别。未嵌入信息时, 差分图像中的差值均集中于零值附近, 使得直方图表现为基本上左右对称的较为陡峭的山峰形状; 而嵌入信息后, 由于空间相关性遭到破坏, 差值在零值附近的分布趋于分散, 使得直方图虽然仍为左右对称的山峰形状, 但是山峰的峰值下降, 坡度变缓。因此, 四方向差分直方图可以

有效反映隐写前后的空间相关性变化。

2.2 隐写对时间相关性的影响

与静止图像相比, 视频序列不仅在单个帧内部具有空间相关性, 而且在相邻帧之间亦存在强相关性, 即时间相关性。在视频序列中嵌入信息后, 由于对像素的修改是随机的, 使得相邻帧中原本相似的区域发生一定的变化。这种变化虽然对人眼来说是不可觉察的, 但却使得相邻帧之间的时间相关性受到了破坏, 因此, 可以通过时间相关性变化来分析视频中是否存在秘密信息。

帧间差能够在一定程度上反应时间相关性的变化, 其中的平滑区域表示相邻帧中变化不大的区域, 即相邻帧的对应区域间存在较强相关性; 而帧间差中的纹理复杂区域则表示存在变化的区域, 其对应的相关性较弱。用 $\mathbf{F}_i, \mathbf{F}_{i+1}$ 表示相邻两帧, 其中 $i = 1, 2, \dots, N-1$, 则帧间差为 $\mathbf{D}_i = \mathbf{F}_i - \mathbf{F}_{i+1}$ 。设灰度级为 m , 则帧间差中各个差值的取值区间为 $[-m+1, m-1]$ 。对于任意的相邻两帧而言, 其中是否存在秘密信息的情况分为以下几种:

- 1) 相邻两帧中均不存在秘密信息;
- 2) 仅前一帧中存在秘密信息;
- 3) 仅后一帧中存在秘密信息;
- 4) 相邻两帧中均存在秘密信息。

从测试序列“akiyo”中任选相邻的两帧, 图1(a)~(d)分别为对应上述4种情况时的帧间差。这里嵌入信息时的幅度系数 $\alpha = 1$ 。为了便于显示, 图中的帧间差均进行了灰度级拉伸。可见, 没有信息嵌入时, 帧间差中除了运动区域的边缘具有较复杂纹理外, 其他大部分区域是平滑的, 即纹理复杂度很低, 说明相邻帧之间具有强相关性。而只要相邻两帧中有一帧嵌入了信息, 帧间差中不仅运动区域的边缘具有较复杂纹理, 其他区域的纹理复杂度亦明显增强, 说明相邻帧的相关性受到了削弱。

图1(e)~(h)显示了各种情况下的帧间差直方图。可见, 信息嵌入前后的帧间差直方图存在明显变化。

首先, 嵌入信息后帧间差中零值的出现次数明显减少。未嵌信息时, 由于相邻帧的相似性, 帧间差中的大部分差值为零; 而秘密信息随机嵌入到各个像素中以后, 相邻帧中相似的区域发生了变化, 从而使得帧间差中零值的数量减少。

其次, 嵌入信息后, 直方图中出现了局部极值。对于相邻帧 $\mathbf{F}_i, \mathbf{F}_{i+1}$, 设嵌入到两帧中的扩频序列分

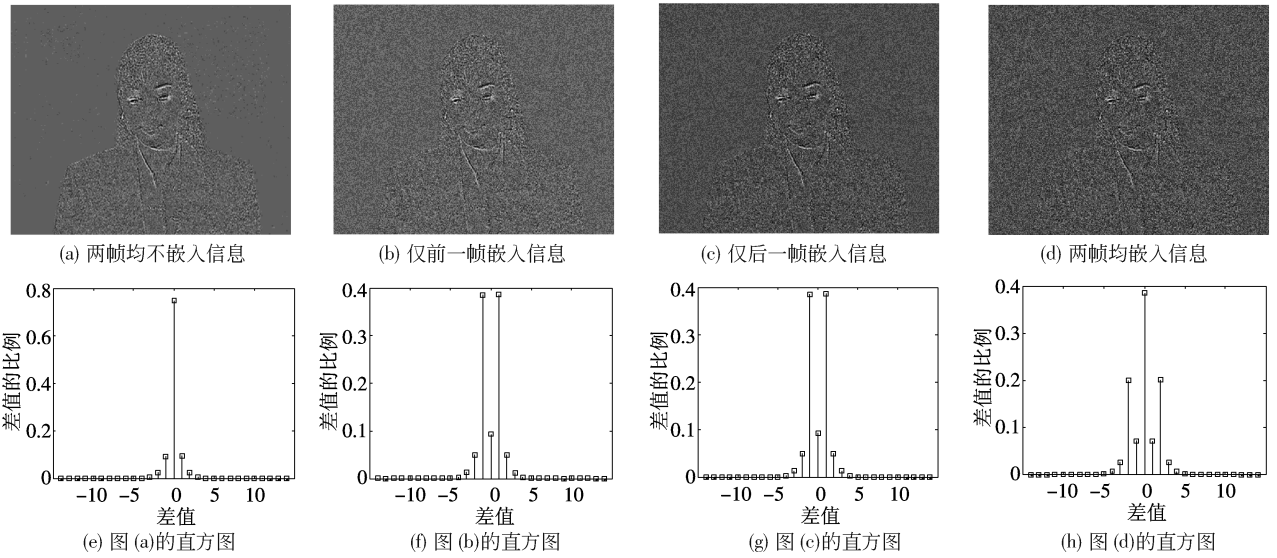


图 1 不同情况下的帧间差及其直方图

Fig. 1 Frame difference and corresponding histogram

别为 W_i, W_{i+1} , 相应的幅度系数均为 α , 以下为不同情况时的帧间差。

- 1) 在 F_i 和 F_{i+1} 中均不嵌入信息时, 其帧间差为 $D_{i00} = F_i - F_{i+1}$;
- 2) 仅在 F_i 中嵌入信息时, 其帧间差为 $D_{i10} = F_i + W_i - F_{i+1}$;
- 3) 仅在 F_{i+1} 中嵌入信息时, 其帧间差为 $D_{i01} = F_i - F_{i+1} - W_{i+1}$;
- 4) 在 F_i 和 F_{i+1} 中均嵌入信息时, 其帧间差为 $D_{i11} = F_i + W_i - F_{i+1} - W_{i+1}$ 。

两帧中均不嵌入信息时, 由于相邻帧的相似性, 因此帧间差直方图中仅在零值处出现峰值。

仅在其中一帧中嵌入信息时, 嵌入信息的帧中像素值的改变幅度为 α , 因此导致直方图在 α 和 $-\alpha$ 处出现局部极值。此外, 由于嵌入的扩频序列的伪随机性, 对嵌入信息的帧的改变是相似的, 因此仅在前一帧或仅在后一帧中嵌入信息时的帧间差直方图是非常相似的。

同理, 在相邻帧中均嵌入信息时, 由于两帧中像素值的改变幅度均为 α , 因此直方图在 2α 与 -2α 处出现局部极值。同时帧间差中零值的数量减少, 但是减少的幅度小于仅在一帧中嵌入信息的情况。

2.3 时空相关性的度量

根据上述分析, 信息嵌入对视频序列的空间和时间相关性均产生严重影响。其中, 对空间相关性的影响表现为嵌入信息后差分直方图的峰值下降,

坡度变缓; 对时间相关性的影响表现为嵌入信息后帧间差直方图中出现局部极值, 且零值的比例减少。因此, 使用差分图像的前四阶矩, 即均值、方差、偏度和峰度描述系数分布的统计量, 以及零值的比例作为特征向量, 来度量时空相关性的变化。

差分直方图及帧间差直方图均为离散的函数, 将其记为 $h(d_k) = n_k/n$, 其中第 k 个差值 $d_k \in [-m+1, m-1]$ (m 是图像灰度级), $k \in [1, 2m-1]$, n_k 是等于 d_k 的差值的个数, n 是差值的总数。可见, $h(d_k)$ 给出了差值 d_k 出现的概率估计值。均值、方差、偏度和峰度的计算方法为

$$\mu = \sum_{i=1}^{2m-1} d_i h(d_i) \tag{9}$$

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^{2m-1} (d_i - \mu)^2 h(d_i) \tag{10}$$

$$\zeta = \frac{\sum_{i=1}^{2m-1} (d_i - \mu)^3 h(d_i)}{\sigma^3} \tag{11}$$

$$\kappa = \frac{\sum_{i=1}^{2m-1} (d_i - \mu)^4 h(d_i)}{\sigma^4} \tag{12}$$

由直方图定义, 差分图像中零值所占比例为 $h(0)$, 即直方图的中心。因此, 提取各帧的特征向量, 然后再对各帧进行平均, 得到反映视频序列时空相关性的特征向量。具体方法如下:

- 1) 对视频序列中各帧 $F_i (i=1, 2, \dots, N)$, 计算四方向差分图像及其直方图, 然后分别计算均值、方

差、偏度、峰度及零值的比例,得到 $4 \times 5 = 20$ 个度量空间相关性的特征向量,记为 $SC_{i(u)}$,其中 $1 \leq u \leq 20$,表示第 i 帧中的第 u 个特征;

2) 对序列中的相邻帧 F_j 和 F_{j+1} ($j = 1, 2, \dots, N-1$),依次计算帧间差及其直方图,同样计算均值、方差、偏度、峰度及零值的比例,组成度量时间相关性的5个特征向量,记为 $TC_{j(v)}$,其中 $1 \leq v \leq 5$,表示第 j 个帧间差中的第 v 个特征;

3) 对于各个帧计算得到的 $SC_{i(u)}$ 和 $TC_{j(v)}$,分别用视频序列中帧的数量 N 和帧间差的计算次数 $N-1$ 进行标准化处理,即

$$SC_u = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N SC_{i(u)} \quad u = 1, 2, \dots, 20 \quad (13)$$

$$TC_v = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^{N-1} TC_{j(v)} \quad v = 1, 2, \dots, 5 \quad (14)$$

由于视频所具有的大数据量,各帧的颜色、纹理、亮度以及视频采集时的噪声等因素都会对这些特征产生很大影响,因此很多情况下难以找出合适的区分载体视频与载密视频的判决阈值。针对这一问题,对特征向量采用分类器进行训练与分类,以得到待检测对象中是否存在隐藏信息的判决。由于支持向量机(SVM)在高维非线性空间能够较好地对待特征向量进行分类,具有很强的泛化能力,对样本数量和质量依赖较小,因此采用SVM作为分类器。在SVM方法中,使用不同的内积函数,就可以实现多项式逼近、径向基函数(RBF)方法等多种学习算法。本文采用径向基函数作为核函数:

$$K(x_i, x_j) = \exp(-\gamma \|x_i - x_j\|^2) \quad (15)$$

具体的实现工具是 LIBSVM^[19]。

3 实验结果及分析

从网络上下载 100 段视频序列,分别提取各个序列前 30 帧的亮度分量,得到 100 段视频作为载体序列。对各个载体序列,分别随机选择 $n = 10$ 帧、 $n = 20$ 帧和 $n = 30$ 帧,并以不同的强度 $\alpha = 1, 2, 3$ 嵌入信息,得到 900 段载密序列。

3.1 未压缩视频的检测结果

对上述1 000段视频序列不进行压缩,直接使用本文方法进行隐写分析,并与文献[10-11]中的方法进行比较(以下分别称为 Budhia 方法和 Pankaj 方法)。从载体视频库和载密视频库中分别随机选择 50% 的视频作为训练集,其他视频组成测试集。对

各段视频,分别提取特征向量,然后采用 LIBSVM 进行训练与分类,交叉验证过程中用网格搜索法自动寻找最优的惩罚因子 C 和核函数的参数 γ 。为了使比较结果更为公平,对其他两种方法也使用相同方法进行训练和分类。

以 ROC(receiver operating characteristic) 曲线描绘隐写分析的性能,图 2 显示了本文方法和其他两种方法在 $\alpha = 1$ 和 $\alpha = 3$ 时的 ROC 曲线。可见,在虚警率为零时,本文方法的检测率可达到 70% 以上, $\alpha = 3$ 时甚至可达 90% 以上。另外,对 α 和 n 取值不同的 ROC 曲线下面积(AUC)进行了比较,表 1 给出了比较结果。AUC 越接近于 1,说明检测性能越好。可见,本文方法优于另外两种方法。

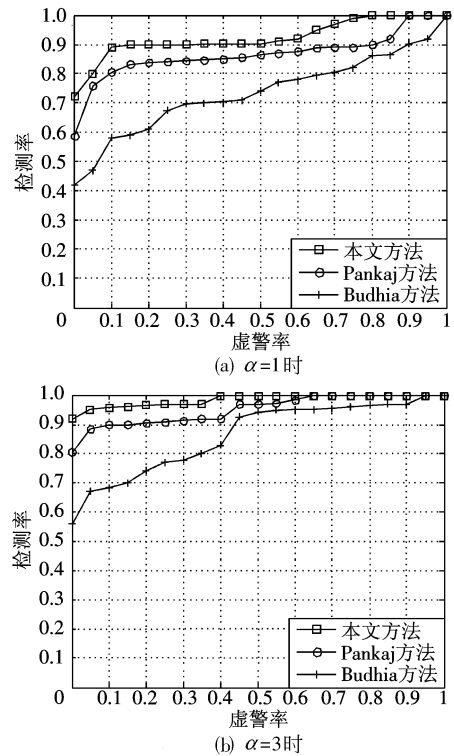


图 2 α 取值不同时的 ROC 曲线
Fig.2 ROC curve for different value of α

表 1 各种情况下不同方法的 AUC 对比

Tab.1 Comparison of AUC for different methods

不同情况	本文方法	Budhia 方法	Pankaj 方法
$\alpha = 1$	0.924 9	0.734 9	0.868 3
$\alpha = 2$	0.980 2	0.810 4	0.939 8
$\alpha = 3$	0.985 2	0.864 8	0.952 5
$n = 10$	0.933 0	0.768 4	0.886 3
$n = 20$	0.992 7	0.828 0	0.927 0
$n = 30$	0.998 6	0.846 5	0.953 1

3.2 压缩视频的检测结果

为了进一步测试视频压缩对算法性能的影响,使用标准 MPEG-2 压缩算法对以上 1 000 段未压缩序列分别以不同的码率(4 Mbps, 2 Mbps 和 1 Mbps)进行压缩,得到 3 000 段视频组成压缩视频库,包括 300 段载体视频和 2 700 段载密视频。同样,分别从

载体库和载密库中各随机选择 50% 的视频作为训练集,其他视频作为测试集,然后提取特征向量并采用 LIBSVM 进行训练与分类。图 3 给出了不同码率时的 ROC 曲线,同样与 Budhia 方法和 Pankaj 方法进行比较。可见,即使压缩码率低至 1 Mbps,本文方法在虚警率为 5% 时,仍可得到近 70% 的检测率。

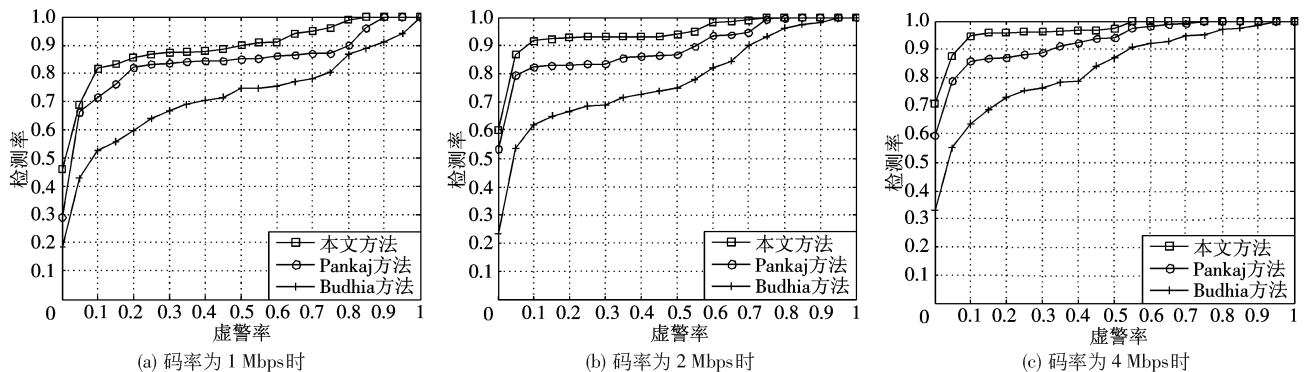


图 3 不同码率时的 ROC 曲线对比

Fig. 3 Comparison of ROC curve for different bit rates

综合以上分析可知,无论是对未压缩视频还是对压缩视频进行检测,本文算法性能均优于另外两种算法,特别是明显优于 Budhia 算法。按照算法性能排序:本文算法 > Pankaj 算法 > Budhia 算法。但是视频压缩后本文算法性能有所降低,并且压缩后的视频码率越低,检测效果越差。这是因为视频压缩同样影响视频序列的时空相关性,并且码率越低,对时空相关性的影响越强,因此对检测结果的影响越明显。

3.3 时空相关性对检测性能的不同影响

为了分析时空相关性对检测性能的不同影响,对于本文构建的未压缩库,在幅度系数 α 及载密帧数 n 不同的情况下,分别仅考虑空间相关性、仅考虑时间相关性,以及综合考虑时空相关性来进行实验。每次随机选择 50% 的视频用于训练,其余 50% 的视频用于测试。对 10 次实验的结果求平均,图 4 以柱状图的形式对比了不同情况下的检测结果。可见,时间相关性和空间相关性的结合,提高了算法的检测性能。

4 结论

针对视频中的扩频隐写算法,本文将隐写过程建模为加性高斯噪声的叠加过程,分析了噪声叠加对时间相关性和空间相关性的影响,提出了基于时

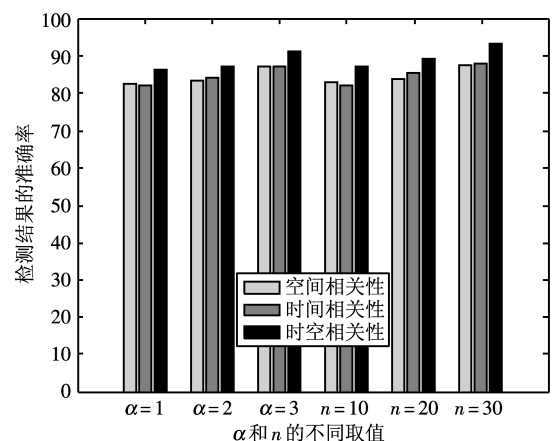


图 4 时空相关性对检测性能的不同影响

Fig. 4 Difference detection performance attribute to spatial and temporal correlation

空相关性的隐写分析方法,利用时空相关性度量隐写前后视频统计特性的变化并检测隐藏信息的存在性。实验结果表明,本文方法对于未压缩视频和压缩视频,均能实现隐藏信息存在性的有效检测,同时空间相关性和时间相关性的有效结合,提高了隐藏信息检测的性能。下一步的工作是对隐写方法进行进一步地深入分析,以估计隐藏容量等参数。

参考文献 (References)

[1] Wang Shuozhong, Zhang Xinpeng, Zhang Kaiwen. Steganography

- and Steganalysis[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005. [王朔中, 张新鹏, 张开文. 数字密写与密写分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.]
- [2] Fridrich J, Goljan M, Du R. Detecting LSB steganography in color and gray-scale images[J]. Magazine of IEEE Multimedia, 2001, 10/11: 22-28.
- [3] Dumitrescu S, Wu X, Wang Z. Detection of LSB steganography via sample pair analysis[C]//Proceedings of the 5th Information Hiding Workshop, Berlin, Springer-Verlag, 2003: 355-372.
- [4] Ker A D. Steganalysis of LSB matching in grayscale images[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2005, 12(6): 441-444.
- [5] Lyu S, Farid H. Steganalysis using higher-order image statistics[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2006, 1(1): 111-119.
- [6] Huang F, Li B, Huang J. Attacking LSB matching steganography by counting alteration rate of the number of neighbourhood gray levels[C]//Proceedings of International Conference on Image Processing. Washington DC, USA: IEEE, 2007: 1-401-404.
- [7] Fridrich J, Goljan M, Hoge D. Steganalysis of JPEG images: Breaking the F5 algorithm [C]//Proceedings of the 5th Information Hiding Workshop, Berlin, Springer-Verlag, 2003: 310-323.
- [8] Fridrich J. Feature-based steganalysis for JPEG images and its implications for future design of steganographic schemes[C]//Proceedings of the 6th Information Hiding Workshop, Berlin, Springer-verlag, 2004: 67-81.
- [9] Wang Y, Moulin P. Optimized feature extraction for learning-based image steganalysis[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2007, 2(1): 31-45.
- [10] Budhia U, Kundur D, Zourmos T. Digital video steganalysis exploiting statistical visibility in the temporal domain[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2006, 1(4): 502-516.
- [11] Pankajakshan V, Ho A T S. Improving video steganalysis using temporal correlation [C]//Proceedings of International Conference on Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing. Washington DC, USA: IEEE, 2007: 287-290.
- [12] Zhang C, Su Y, Zhang C. Video steganalysis based on aliasing detection[J]. Electronics letters, 2008, 44(13): 801-803.
- [13] Cox I J, Kilian J, Leighton T, et al. Secure spread spectrum watermarking for multimedia[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(12): 1673-1687.
- [14] Hartung F, Girod B. Watermarking of uncompressed and compressed video[J]. Signal Processing, 1998, 66(3): 283-301.
- [15] Liang Huaqing, Wang Lei, Shuang Kai, et al. A robust video watermarking scheme of raw frames [J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2003, 25(9): 1281-1284. [梁华庆, 王磊, 双凯, 等. 一种在原始视频帧中嵌入的鲁棒的数字水印[J]. 电子与信息学报, 2003, 25(9): 1281-1284.]
- [16] Marvel L M, Boncelet C G, Retter C T. Spread spectrum image steganography [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1999, 8(8): 1075-1083.
- [17] Harmsen J J, Pearlman W A. Steganalysis of additive noise modelable information hiding [C]//Proceedings of SPIE Electronic Imaging 5022. Bellingham, WA, USA: SPIE, 2003: 21-24.
- [18] Wu Mingqiao, Zhu Zhongliang, Jin Shiyao. Secret key estimation in sequential steganography based on the laplacian model[J]. Computer Engineering & Science, 2008, 30(2): 9-14. [吴明巧, 朱中梁, 金士尧. 基于拉普拉斯模型的序列隐写密钥估计[J]. 计算机工程与科学, 2008, 30(2): 9-14.]
- [19] Chang C C, Lin C J. LIBSVM: A library for support vector machines[CP/OL]. [2009-02-18]. <http://www.csie.ntu.edu.tw/~cjlin/libsvm>.