

一种针对 LSB 匹配隐写的视频隐写分析方法

蒋 琴, 杨高波

(湖南大学 计算机与通信学院, 湖南 长沙 410082)

摘 要:针对视频 LSB 匹配隐写,提出了一种基于区域相关性原理,通过构造区域相关性图直接提取载体或载密视频帧特征,应用中值滤波去除不同视频载体之间的特征差异,逐帧进行视频隐写分析的方法。实验结果表明,该算法能有效检测每帧均进行嵌入且嵌入率仅为 $p=0.1$ 时的视频,而且在只对 20% 的视频帧进行混合嵌入的情况下,也能达到 90.91% 的正确检测率。

关键词:最低有效位匹配隐写;视频隐写分析;区域相关性;中值滤波;支持向量机

中图分类号: TP391.1

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2011)01-0062-06

A Video Steganalysis Scheme of LSB Matching Steganalysis

JIANG Qin, YANG Gaobo

(College of Computer and Communication, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China)

Abstract: In this paper, a regional correlation-based principle was proposed according to the video LSB matching steganography. By constructing the images of regional correlation, the features were extracted from carriers or stego-video frequency frames, and then, median filter was applied to remove the differences of features between different carriers. Experimental results showed that the algorithm could detect not only all video frequency frames were embedded with the embedding rate of $p=0.1$ effectively, but also the accuracy could be 90.91% under the situation of only 20% of video frequency frames were made with mixed embedding.

Key words: LSB matching steganography; video steganalysis; regional correlation; median filter; support vector machine

隐写与隐写分析是网络信息对抗的主题之一^[1]。隐写将秘密信息以伪装的形式嵌入到文本、图像、视频等数字载体,实现不为人知的隐蔽通信。相反,作为隐写的对立面,隐写分析则是利用含密载体统计特性的改变揭露秘密信息的存在性,甚至提取秘密信息。目前,对于隐写与隐写分析的研究以静止图像为主,但由于以流媒体为代表的视频的广泛应用,基于视频隐写的隐蔽通信成为可能,因而视频隐写及其对抗技术日益成为信息安全领域的研究热点。

视频隐写分析算法主要利用视频帧间的相关性,通过共谋攻击获得载体帧的估计,并从含密帧与估计帧的残差帧(prediction error frame, PEF)提取分类特征进行判别。Budhia 等^[2]提出了一种基于时域帧平均检测高斯扩频隐写的视频隐写分析算法。Jainsky 等^[3]应用相邻两帧插补出当前帧的帧插补共谋攻击和渐进相对效率非参量方法进行视频隐写检测。上述两种算法均只考虑将嵌入的秘密信息作为相邻帧差的主要成分,对于存在局部运动的视频检测准确度低。刘宾等^[4]将秘密信息和局部运动建模为双模噪声,提出了一种基于视频帧间分块相关度的视频隐写分析算法,在一定程度上降低了局部运动的影响。Pankajakshan 等^[5]

收稿日期: 2010-09-28

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)前期研究专项(2010CB334706); 国家自然科学基金项目(60702065, 61072122)。

作者简介: 蒋 琴(1985—),女,湖南益阳人,硕士研究生,主要从事视频隐写分析研究。E-mail: qinjiang0723@163.com.

杨高波(1974—),男,湖南岳阳人,博士,教授,主要从事视频信息安全、多媒体通信等研究。

利用基于亚像素运动补偿的时域帧平均得到 PEF, 通过计算 PEF 的方差是否符合 Gamma 分布来判断视频流中是否有秘密信息, 该算法性能优于文献[4], 但计算复杂度高。

现有的视频隐写分析算法主要都是针对扩频隐写、LSB(least significant bit, 最低有效位)替代隐写和 MSU StegoVideo 等, 尚未发现针对 LSB 匹配隐写的视频隐写分析方法。LSB 匹配隐写克服了 LSB 替代隐写引入的统计不对称性, 检测难度更大, 是当前隐写分析研究的难点。图像 LSB 匹配隐写分析的代表性文献有: Harmsen 等^[6]基于加性噪声模型提取直方图特征函数质心作为分类特征; Ker 等^[7]在此基础上通过计算采样图像相邻像素的二维直方图特征, 改善了灰度图像 LSB 隐写分析的检测性能; Goljan 等^[8]提出了应用小波绝对矩进行通用隐写分析的算法, 对于压缩图像性能要优于 Ker 的方法; Chen 等^[9]提出了一种基于区域相关性的检测算法, 但仅能实现对嵌入率高于 30% 的 LSB 匹配嵌入的有效检测。

本文受文献[9]区域相关性思想的启发, 提出了一种通过构造区域相关性图进行视频 LSB 匹配隐写分析的方法。

1 LSB 匹配隐写

相对于 LSB 替代隐写, LSB 匹配隐写的改进之处在于, 当载体嵌入点的像素值与要嵌入的秘密信息比特不一致时, 根据随机性准则对该点像素值加 1 或减 1。本研究采取基于区域相关性的匹配准则^[10], 通过计算 8 邻域内像素与中心像素差值的平均值来确定区域相关性 T , 如式(1)所示:

$$T(i, j) = \frac{1}{8} \left(\sum_{u=i-1}^{i+1} \sum_{v=j-1}^{j+1} x_{u,v} - 9x_{i,j} \right). \quad (1)$$

T 反应了某个区域的相关程度, $T \in [-255, 255]$, T 的绝对值越小, 说明该区域相关性越高。

根据上述匹配准则, LSB 匹配隐写原理可用式(2)描述:

$$x'_i = \begin{cases} x_i, & m_i = (x_i \bmod 2) \\ x_i - 1, & m_i \neq (x_i \bmod 2) \&\& (x_i = 255 \parallel T > 0). \\ x_i + 1, & m_i \neq (x_i \bmod 2) \&\& (x_i = 0 \parallel T < 0) \end{cases} \quad (2)$$

式中, x_i 表示嵌入点的像素值, m_i 表示待嵌入的秘密信息比特, x'_i 表示嵌入秘密信息后的像素值。

2 基于区域相关性的特征提取

2.1 视频帧预处理 —— 构造 RC 图

根据式(1), 对视频帧进行预处理。通过计算视频帧每个像素点的区域相关性 T 值的绝对值 $|T|$, 使得由像素点构成的视频帧变成了由区域相关性 $|T|$ 值构成的视频帧, 本研究将其称作 RC(Regional Correlation) 图。这样做大大缩小了视频帧数据的取值范围, 因为经过大量实验统计发现, $|T|$ 值的主要分布区间为 $[0, 160]$ 。若无特别说明, 本研究后面提到的 T 即指取绝对值后的 $|T|$ 。

2.2 提取 RC 图相关特征

2.2.1 RC 图的一维直方图统计特征

设视频帧大小为 $m \times n$, $h(d)$ 定义为 RC 图的直方图, 其定义如式(3)所示:

$$h(d) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \delta(T(i, j), d). \quad (3)$$

由于载体视频帧区域相关性比较强, 而 LSB 匹配隐写会减弱这种相关性, 即会使得 T 取值为 0, 1 的数目减少, 而 $T \geq 2$ 的取值会相应增加。选用如式(4)与式(5)所示的 t_1, t_2 作为分类特征 1 与特征 2, 隐写后视频帧的这两个特征都将增大。

$$\text{特征 1} \quad t_1 = \frac{1}{h(0) + h(1)}; \quad (4)$$

$$\text{特征 2} \quad t_2 = \left[\frac{\sum_{d=2}^6 h(d)}{h(0) + h(1)} \right] \times \frac{\sum_{d=0}^6 h(d)}{\sum_{d=0}^6 h(d)}; \quad (5)$$

特征 3
$$t_3 = \frac{\sum_{k=0}^{N/2} |H(k)| \times k}{\sum_{k=0}^{N/2} |H(k)|}, N \text{ 为 DFT 的长度, } H(k) = \text{DFT}(h(d)). \quad (6)$$

t_3 为 RC 图直方图特征函数质心。LSB 匹配隐写相当于对载体视频帧进行了低通滤波,使得 RC 图直方图趋于平滑,从而使得视频帧 RC 图直方图特征函数质心降低。

特征 4
$$M = \sum_{d=0}^{L-1} \left[\frac{h(d)}{m \times n} \times d \right], L \text{ 为 } T \text{ 图取值级数}; \quad (7)$$

特征 5
$$\sigma^2(d) = \sum_{d=0}^{L-1} \left[(d - M)^2 \times \frac{h(d)}{m \times n} \right]; \quad (8)$$

特征 6
$$r = 1 - \frac{1}{1 + \sigma^2(d)}; \quad (9)$$

特征 7
$$U = \sum_{d=0}^{L-1} \left[\frac{h(d)}{m \times n} \right]^2; \quad (10)$$

特征 8
$$e = - \sum_{d=0}^{L-1} \left[\frac{h(d)}{m \times n} \times \log_2 \left(\frac{h(d)}{m \times n} \right) \right]; \quad (11)$$

特征 9
$$\mu_3(d) = \sum_{d=0}^{L-1} \left[(d - M)^3 \times \frac{h(d)}{m \times n} \right]. \quad (12)$$

M 为 RC 图均值, LSB 匹配隐写后, T 值趋于增大, 其平均值也增大。 $\sigma^2(d)$ 为其方差, 由于 LSB 匹配隐写相当于对 RC 图进行了平滑, 因此隐写后该值减小。 r 是 $\sigma^2(d)$ 的一种量度, 它反映了 RC 图的平滑度, 方差越大, r 越接近于 1, 隐写后, r 同样也趋于减小。 U 为一致性量度, 对于所有取值都相等的图像有最大值并从该值开始递减, 隐写使其增大。 e 为 RC 图信息熵, 信息熵用来衡量一幅图像的有序性, 一幅图像越有序, 其值越低, LSB 匹配隐写破坏了 RC 图的有序性, 从而使得隐写后的信息熵增大。 $\mu_3(d)$ 为 RC 图三阶距, 表示直方图的偏斜度, 隐写同样使其减小。

2.2.2 RC 图的二维直方图统计特征

计算 RC 图的二维直方图(式(13)), x 可取水平($\Delta m = 0, \Delta n = 1$)、垂直($\Delta m = 1, \Delta n = 0$)、对角($\Delta m = 1, \Delta n = 1$)、反对角($\Delta m = 1, \Delta n = -1$)四个方向, $h^2(d_1, d_2)$ 为上述四个方向 RC 图二维直方图的平均值(式(14))。

$$h_x^2(d_1, d_2) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n-1} \delta(T(i, j) = d_1, T(i + \Delta m, j + \Delta n) = d_2), \quad (13)$$

$$h^2(d_1, d_2) = \frac{h_h^2(d_1, d_2) + h_v^2(d_1, d_2) + h_d^2(d_1, d_2) + h_{ad}^2(d_1, d_2)}{4}. \quad (14)$$

特征 10
$$t_{10} = \frac{1}{\sum_{d_1=0}^1 \sum_{d_2=0}^{L-1} h^2(d_1, d_2) + \sum_{d_1=0}^{L-1} \sum_{d_2=0}^1 h^2(d_1, d_2)}; \quad (15)$$

特征 11
$$t_{11} = \frac{\sum_{k_1=0}^{N/2} \sum_{k_2=0}^{N/2} [H^2(k_1, k_2) \times (k_1 + k_2)]}{\sum_{k_1=0}^N \sum_{k_2=0}^N H^2(k_1, k_2)}, H^2(k_1, k_2) = \text{DFT}(h^2(d_1, d_2)). \quad (16)$$

t_{10} 隐写后趋于降低, t_{11} 为二维直方图特征函数质心, LSB 匹配隐写后该值降低。

2.3 基于中值滤波方法去除不同视频载体间特征差异

提取的上述 11 个 RC 图特征虽能较好地地区分同一载体与载密视频, 但由于不同视频载体之间特征差异较大, 甚至超过了载体与载密间的差异, 在没有提供原始视频的情况下是难以进行判别的。为了消除不同视频之间特征差异对检测的影响, 本研究采用中值滤波方法对视频帧进行估计, 得到其估计帧, 再分别提取原帧和估计帧的特征, 根据式(17)得到最后用于分类的特征 t'_i 。 t'_i 仍然满足视频帧隐写后增大或减小的性质, 但却减小了不同视频载体间的特征差异, 从而改善了分类效果。

$$t'_i = \frac{t_i}{t_{\text{estimated},i}} \quad (17)$$

2.4 基于支持向量机(SVM) 的分类

本研究选用在处理小样本、非线性及高维模式识别问题中表现出显著优势的支持向量机(support vector machine, SVM) 作为分类器^[11]。SVM 是基于统计学理论的学习方法^[11], 其基本思想是:

- 1) 基于结构风险最小化, 通过最小化函数集的 VC 维来控制学习机器的结构风险, 使其具有较强的推广能力;
- 2) 通过最大化分类间隔来实现对 VC 维的控制;
- 3) SVM 在技术上采用核化技术, 根据泛函中的 Mercer 定理, 寻找一个函数(称核函数) 将样本空间中内积对应于变换空间中的内积, 即避免求非线性映射而求内积。

3 实验结果及分析

本研究采用 Lin Chih-Jen 提供的 libsvm 分类程序进行载体与载密视频的分类, 使用径向基函数作为其核函数。在分类前, 按式(18) 将用于分类的特征归一化到 $[-1, +1]$ 之间:

$$t''_i = \frac{2 \times (t'_i - \min(t'_i))}{\max(t'_i) - \min(t'_i)} - 1 \quad (18)$$

其中, $\min(t'_i)$, $\max(t'_i)$ 分别为求得的第 i 个特征的最小值与最大值。

本研究实验对象为 26 个原始视频序列, 包含运动较迅速或较缓慢的各类序列, 每个序列帧长均为 100 帧, 其帧大小有 3 种类型: 4CIF, CIF, QCIF。实验采用 3 折交叉验证。从样本库中以 2:1 的比例随机选取训练样本和测试样本, 先提取训练样本中的分类特征作为 SVM 的输入, 实施训练, 得到最优分类模型, 再用已训练好的分类器去检测待测视频样本是否含可疑信息。为了得到精确的分类结果, 按上述过程重复进行 50 次, 取其平均结果。

3.1 提取的分类特征的有效性

为了验证经中值滤波去除不同视频载体差异后得到的特征的分类效果, 可分别提取原载体与载密视频的 t_1-t_{11} , 以及经中值滤波后得到的 $t'_1-t'_{11}$ 作比较。为了直观地显示其差别, 这里仅在 3 个视频序列(stefan_cif.yuv, mobile_cif.yuv, harbour_4cif.yuv) 中提取相同的 3 个特征($t_3, t_4, t_9, t'_3, t'_4, t'_9$), 各产生 1 个三维散点图, 如图 1 所示。

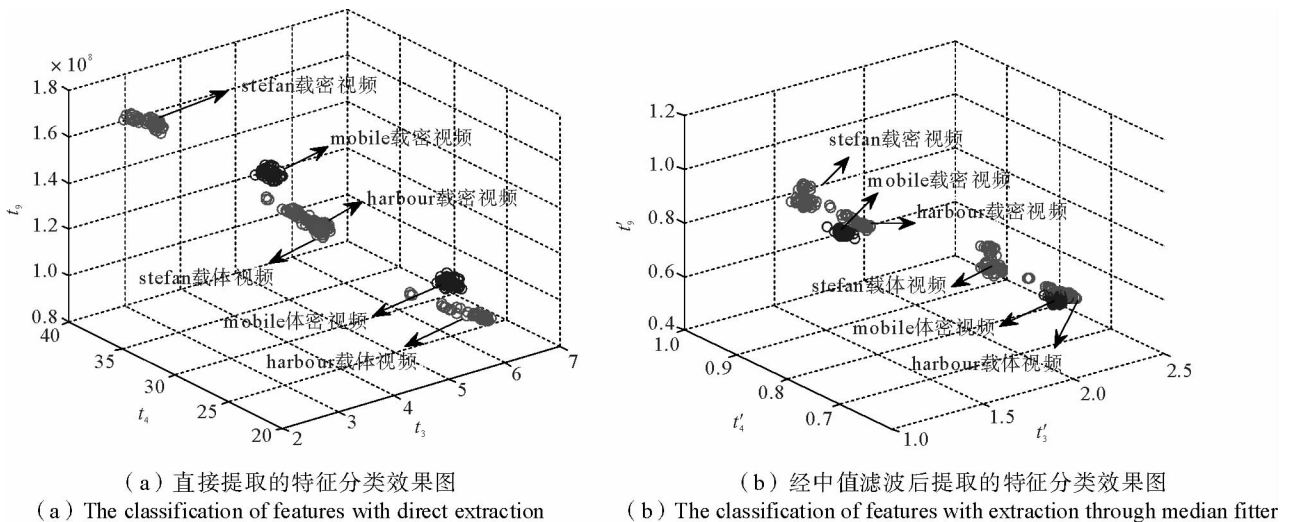


图 1 直接提取与经中值滤波后提取的特征分类效果图

Fig.1 The classification of features with direct extraction and extraction through median filter

从图 1 可看出,直接提取的三维分类特征出现了 stefan_cif.yuv 载体视频与 harbour_4cif.yuv 载密视频的部分重叠,而经中值滤波提取的三维分类特征能明显地区分出载体与载密视频,可见本研究采用中值滤波去除不同视频载体间特征差异的效果较好,为提高分类性能打下了基础。

3.2 所有帧均嵌入时的分类性能

在视频序列的每一帧中都嵌入秘密信息,其单帧嵌入率一致,嵌入率 $p=1, 0.75, 0.50, 0.25, 0.10$ 时,载密视频的检测结果如表 1 所示。

由表 1 可见,本研究算法对所有帧均进行嵌入时的分类效果很好,其虚警率和漏检率都很低,并且随着嵌入率的降低,其检测率也仅有微小下降,当嵌入率仅为 0.10 时,仍能得到较高的检测率。

3.3 混合嵌入时的分类性能

随机选择部分视频帧进行嵌入,载密帧的帧数可选 80%, 60%, 40%, 20%, 每视频序列的单帧嵌入率可随机从 $p=0.75, 0.50, 0.25, 0.10$ 中选取一种,其分类结果如表 2 所示。

由表 2 可见,当一个视频序列中包含多种嵌入率时,本研究算法对于嵌入率越高的帧或是未隐写的帧检测率都较高,而对于嵌入率较低的帧,则容易误判为不含秘密信息的视频帧,并且随着视频序列载密视频帧比例的减小,其误判率进一步加大,但总的说来,本研究算法对视频 LSB 匹配隐写混合嵌入情况下的平均检测率还是比较高的。

4 结束语

本研究提出了一种基于区域相关性进行 LSB 匹配隐写的视频隐写分析方法。通过构造 RC 图并提取其相关统计特征,再经中值滤波去除不同视频序列特征的差异,来实现对载体与载密视频的分类。实验结果表明,本文的视频隐写分析方法能有效地检测出所有帧均嵌入秘密信息以及部分帧进行混合嵌入时的载体与载密视频,同时,采用逐帧进行视频隐写分析的方法,对于抵抗帧删除、帧插入、帧移动等时域攻击方法鲁棒性也较好。进一步的研究将着眼于检测频域 LSB 匹配隐写及其它视频隐写算法,以扩大本文算法的适用范围;同时考虑到基于视频共谋攻击方法的有效性,因此也将结合视频共谋攻击方法与本文算法进行研究,以提高视频隐写分析的有效性。

参考文献:

[1] WANG H, WANG S. Cyber warfare: Steganography vs. steganalysis[J]. Communication of Association for Computing Machinery, 2004, 47(10): 76-82.

[2] BUDHIA U, KUNDUR D. Digital video steganalysis using collusion sensitivity[C]//Sensors, and Command, Control, Communications, and Intelligence Technologies for Homeland Security and Homeland Defense III. Orlando, FL, April, 2004: 210-221.

[3] JAINSKY J S, HALVERSON D R, KUNDUR D. Towards digital video steganalysis using asymptotic memoryless detection [C]//Proceedings of the 9th Workshop on Multimedia & Security. New York: ACM Press, 2007: 161-167.

[4] 刘镛, 杨粉林, 杨春芳. 基于帧间共谋的视频隐写分析[J]. 通信学报, 2009, 30(4): 41-49.

LIU Bin, YANG Fenlin, YANG Chunfang. Video steganalysis scheme based on inter-frame collusion[J]. Journal on Commu-

表 1 所有帧嵌入信息时不同嵌入率下的分类结果表

Tab. 1 The classification of all frames embedding data with different rates

单帧嵌入率	正确率	虚警率	漏检率
1.00	0.999 5	0.000 9	0
0.75	0.999 3	0.001 4	0
0.50	0.999 1	0.000 5	0.001 4
0.25	0.998 8	0.002 3	0
0.10	0.974 4	0.027 7	0.023 5

表 2 部分帧嵌入时不同嵌入率下的分类结果表

Tab. 2 The classification of some frames embedding data with different rates

单帧嵌入率	帧嵌入率			
	0.8	0.6	0.4	0.2
	正确率	正确率	正确率	正确率
0	0.915 1	0.975 2	0.944 0	0.902 0
0.75	1.000 0	0.999 0	0.998 7	0.997 3
0.50	1.000 0	0.997 8	1.000 0	0.993 2
0.25	1.000 0	1.000 0	0.992 6	0.984 3
0.10	0.938 1	0.927 6	0.7974	0.668 8
平均检测率	0.970 6	0.979 9	0.946 5	0.909 1

nications, 2009, 30(4):41-49.

- [5] PANKAJAKSHAN V, DOERR G, BORA P K. Detection of motion-incoherent components in video streams[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2009, 4(1):49-58.
- [6] HARMSE J, PEARLMAN W. Steganalysis of additive-noise modelable information hiding[C]//Proceedings of the International Society for Optical Engineering, Security Watermarking Multimedia Contents. Santa Clara, CA, 2003:131-142.
- [7] KER A D. Steganalysis of LSB matching in grayscale images[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2005, 12(6):441-444.
- [8] GOLJAN M, FRIDRICH J, HOLOTYAK T. New blind steganalysis and its implications[C]//Proceedings of the International Society for Optical Engineering, Security, Steganography, and Watermarking of Multimedia Contents VI. San Jose, CA, 2006:1-13.
- [9] CHEN M, LIU F F, ZHANG R, et al. Steganalysis of LSB matching in gray images based on regional correlation analysis [C]//2009 World Congress on Computer Science and Information Engineering. Los Angeles, March, 2009:490-494.
- [10] 王朔中, 张新鹏, 张开文. 数字密写和密写分析[M]. 北京:清华大学出版社, 2005.
- [11] 李蓉, 叶世伟, 史忠植. SVM-KNN 分类器:一种提高 SVM 分类精度的新方法[J]. 电子学报, 2002, 30(5):745-748.
LI Rong, YE Shiwei, SHI Zhongzhi. SVM-KNN classifier: A new method of improving the accuracy of SVM classifier[J]. Acta Electronica Sinica, 2002, 30(5):745-748.

(上接第 57 页)

- [5] SSSU K, OU C, JIAU H. Localization with mobile anchor points in wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2005, 54(3):1187-1197.
- [6] LEE S, KIM E, KIM C, KIM K. Localization with a mobile anchor based on geometric constraints in wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(12):5801-5805.
- [7] GUERRERO E, XIONG H G, GAO Q, et al. ADAL: A distributed range-free localization algorithm based on a mobile anchor for wireless sensor networks[C]//Proceedings of International Conference on Ultra Modern Telecommunications. St. Petersburg, 2009:1-7.
- [8] PATRO R K. Localization in wireless sensor network with mobile anchors[C]//Proceedings of 23rd IEEE Convention of Electrical and Electronics Engineers. Israel, 2004:22-24.
- [9] KOUTSONIKOLAS D, DAS S M, HU Y C. Path planning of mobile landmarks for localization in wireless sensor networks [J]. Computer Communications, 2007, 30:2577-2592.
- [10] VARGA A, HORNIG R. An overview of the OMNeT++ simulation environment[C]//Proceedings of the 1st International Conference on Simulation Tools and Techniques for Communications, Networks and Systems & Workshops. Marseille: ACM, 2008:1-10.