

基于相关性异常的 H.264/AVC 视频运动 矢量隐写分析算法

王丽娜^{1,2}, 王旻杰^{1,2}, 翟黎明^{1,2}, 任延珍^{1,2}

(1. 武汉大学空天信息安全与可信计算教育部重点实验室, 湖北武汉 430072; 2. 武汉大学计算机学院, 湖北武汉 430072)

摘要: 视频隐写分析是信息隐藏领域一个重要的研究方面, 如何在格式复杂的压缩码流中搜寻运动矢量 (Motion Vector, MV) 中所留下的隐藏痕迹并设计隐写分析方法成为当前的研究热点之一. 视频中成像设备和拍摄对象都具有运动相似性, 使得 H.264 视频中基于块的运动估计所生成的 MV 存在较强的邻域相关性, 隐秘信息的嵌入将迫使 MV 相关性出现统计异常. 本文提出了一种基于共生频率异常的 MV 相关性度量方法, 并在此基础上结合 H.264 中与 MV 有关的编码技术, 设计了基于相关性异常的 H.264 视频 MV 隐写分析算法. 在隐写分析检测和性能测试中表明, 本文提出的方法能够针对 H.264 视频 MV 隐藏实现有效检测, 具有检测率高、检测速度快的特点.

关键词: 隐写分析; H.264; 运动矢量; 共生矩阵; 相关性异常

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2014)08-1457-08

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2014.08.001

H.264/AVC Video Steganalysis Algorithm Based on Motion Vector Abnormal Correlation

WANG Li-na^{1,2}, WANG Min-jie^{1,2}, ZHAI Li-ming^{1,2}, REN Yan-zhen^{1,2}

(1. Key Laboratory of Aerospace Information Security and Trusted Computing Ministry of Education, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China; 2. Computer School, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China)

Abstract: Video steganalysis has become an important research direction of the information hiding. How to search for motion vector (MV) hidden traces in the compressed stream with various video formats and design an effective steganalysis algorithm are hotspots in current studying. Movement in the video can be divided into two groups: the imaging equipment movement and the movement of the subject. Due to the block-matching motion estimation in H.264, strong correlations among adjacent macroblock's MV are existed. However, MV-based information hiding will cause anomalies in the correlations between MV. This paper proposes a method of correlation measurement based on anomalous co-occurrence frequency between MV, and on this basis, combined with H.264 coding technology related to MV, designs a steganalysis algorithm for H.264 video. Experimental results demonstrate that the proposed method has the advantages of high speed, and can be used to effectively detect MV-based steganography in the H.264 video.

Key words: steganalysis; H.264; motion vector; co-occurrence matrix; abnormal correlation

1 引言

随着互联网视频业务的发展, 迫切需提升针对互联网内容安全的监管能力. H.264/AVC (简称为 H.264) 作为一种具有高效压缩效率以及良好网络适应性的视频编码标准, 已在互联网中大量应用. 因此以 H.264 视频为隐秘通信载体的隐藏技术与隐写分析技术的对抗已成为国内外研究的热点之一.

H.264 视频中以运动矢量 (Motion Vector, MV) 为载

体进行隐秘通信成为一种主要的隐藏方式. MV 是在视频编码过程中生成的, 由于 MV 最终无损编码写入视频码流, 因此在 MV 上嵌入秘密信息不会因 H.264 的高压缩特性而出现秘密信息无法正确提取的问题. H.264 视频中 MV 隐藏方法的嵌入率远高于在帧内预测模式中嵌入^[1]和在非零 DCT 系数中嵌入^[2,3]等方法, 并且 MV 隐藏不破坏视频的空域以及相关变换域的统计特征. 此外 H.264 标准格式复杂, 隐写分析难度大, 传统视频隐写分析方法难以对其进行检测.

本文针对 H.264 视频中 MV 隐藏,挖掘隐秘信息嵌入对 MV 相关性的影响,结合 H.264 视频的特点设计适用于可变尺寸块的四向扫描方法,最终通过提取相关性异常的 MV 隐写分析特征,实现对 H.264 视频 MV 隐写分析检测。

2 运动矢量隐藏与隐写分析手段

目前国内外对 MV 隐藏和隐写分析已有一些研究,文献[4]提出通过选择视频中非零运动矢量宏块,调整 MV 奇偶性实现秘密信息嵌入的方法.文献[5]综合了 MV 大小和相位角两种嵌入宏块选择方法,并通过重复嵌入、控制信息参数嵌入来提升隐藏算法鲁棒性.文献[6]应用线性分组码降低嵌入对 MV 的修改量.文献[7]将矩阵编码技术与 MV 隐藏技术相结合,降低 MV 嵌入对运动矢量的修改量,提高嵌入效率.文献[8]指出 MV 修改将导致预测误差图像的 DCT 系数能量增大,为提升隐藏算法的隐蔽性,提出了一种基于预测误差图像的 MV 隐藏方法.文献[9]借鉴了文献[10]中的图像扰动量化隐藏技术(Perturbed Quantization)设计了扰动运动估计隐写方法,并采用湿纸编码(Wet Paper)来进行信息的嵌入和提取,该方法能够保证秘密信息提取方在不掌握隐藏规则的前提下,仅使用密钥即可准确提取隐秘信息,增强了隐藏算法的安全性。

在 MV 隐写分析检测方面,文献[11]指出 MV 嵌入将改变 MV 的统计特征,通过将时间域和空间域组合,分别计算其 MV 的混叠度、频率域特征函数的质心等特征,实现 MV 隐写分析检测.文献[12]提出一种基于校准的 MV 隐写分析方法,该文献证明了载密视频通过重编码能够恢复对应原始视频 MV 的宏观特征,故利用校准技术的差异性来构造特征集,实现对 MV 隐写分析.文献[13]中借鉴了文献[14]中所提的运动矢量恢复技术,设计了一种能有效估计原始 MV 的局部多项式核回归模型,通过差异性特征向量实现对 MV 的隐写分析检测。

综上所述,现阶段 MV 嵌入的基本原理是按照一定规则修改 MV 分量从而实现秘密信息的嵌入.而 MV 隐写分析方法均借鉴了图像隐写分析中“预处理+特征提取+分类”的设计思路^[15],以 MV 校准技术为基础构建差异性的特征集合.但是上述方法检测速度慢,针对 H.264 视频适用性差、检测效果不理想.本文综合考虑 H.264 视频中帧间编码的新特点,设计基于相关性异常的 H.264 视频运动矢量隐写分析方法,从而解决上述问题。

3 H.264 视频中帧间编码的新特点

为了提高视频编码效率,H.264 在继承以往的编码标准技术同时,在帧间预测部分采用了可变尺寸块运

动补偿、运动矢量预测等技术,这些技术使得 H.264 下运动矢量的隐写分析工作更加复杂。

3.1 可变大小的尺寸块

H.264 帧间编码中采用基于块匹配的运动估计技术提高压缩比,如图 1 所示,将每一帧划分成许多互不重叠的块,在参考帧的搜索窗内根据一定的匹配准则搜索得到最相似的块(匹配块)^[16],匹配块与编码块之间的相对位移即为 MV。

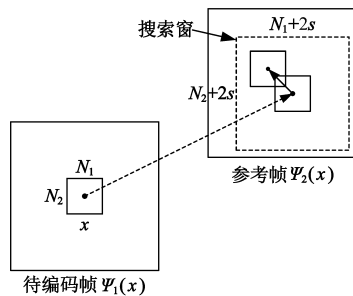


图1 基于块匹配的运动估计

在整个运动估计中,分块大小是影响块匹配精度的主要因素之一.如图 2 所示,每个宏块可划分为 1 个 16×16 、2 个 8×16 或 16×8 、4 个 8×8 的子宏块,对于 8×8 模式的子宏块还可再划分为 1 个 8×8 、2 个 4×8 或 8×4 、4 个 4×4 的子块^[16]。

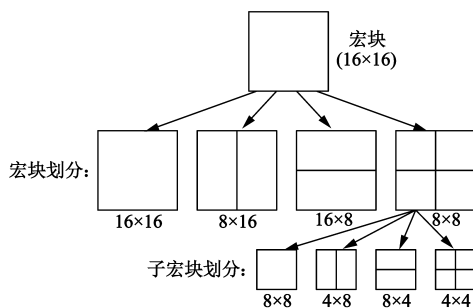


图2 H.264中可变尺寸块运动补偿技术

最终码流中只保存开销最小的块划分模式、MV 和预测误差图像.通过可变尺寸块的预测编码技术能在保证视频编码质量的前提下,提高编码效率。

3.2 复杂的宏块类型

H.264 采用运动矢量预测技术,通过相邻已编码块预测获取 MV.预测得到的 MV 用预测运动矢量(MV_p)表示,MV 与 MV_p 之间的差值用运动矢量残差(MVD)表示.最终被编入 H.264 码流的是 MVD 而非 MV.H.264 视频 MV 隐藏的本质是以 MVD 作为载体的隐秘通信.按照能否实现 MV 隐藏可将 H.264 视频块类型 MB_type 划分为如下三种情况:

情形 1 Read_MV 类型块:

在码流中即包含 MVD,解码端先计算解码块的

MV_p, 最终 $MV = MV_p + MVD$, 这种类型的块可以嵌入秘密信息。

情形 2 Skip、Direct 类型块:

MV_p 等于 MV, 解码端时用 MV_p 恢复解码块, 由于没有 MVD, 这种类型的块无法嵌入秘密信息。

情形 3 Intra 类型块:

采用帧内编码, 不存在 MV, 即 $MV = \text{NULL}$. 这种类型的块无法嵌入秘密信息。

本文统计了 VQEG、CIPR 样本库中视频 P 帧、B 帧各类型块的比例. GOP 为 [I, B, P, B, P, B, P], 其余视频编码参数采用默认值, 结果如下表所示。

表 1 视频样本 P 帧中各类型宏块所占比例

宏块类型	有无 MV	有无 MVD	有无像素残差块	所占比例	宏块比例
Inter_P16x16	有	有	有	25.58%	
Inter_P16x8	有	有	有	8.67%	80.12%
Inter_P8x16	有	有	有	8.16%	可供嵌入
子宏块划分	有	有	有	37.71%	
P_Skip	有	无	无	10.37%	19.88%
Intra 帧内编码	无	无	无	9.51%	无法嵌入

表 2 视频样本中 B 帧中各类型宏块所占比例

宏块类型	有无 MV	有无 MVD	有无像素残差块	所占比例	宏块比例
Inter_B16x16	有	有	有	19.40%	
Inter_B16x8	有	有	有	2.90%	25.72%
Inter_B8x16	有	有	有	2.22%	可供嵌入
Inter_B8x8	有	有	有	1.20%	
B_Direct	有	无	有	18.51%	74.28%
B_Skip	有	无	无	53.22%	无法嵌入
Intra 帧内编码	无	无	无	2.55%	

如表 1 和表 2 所示, H.264 视频中 P 帧可供 MV 隐藏嵌入的宏块比例远远大于 B 帧中对应的比例, 为了提升隐写分析效果, 本文将检测重点放在 P 帧上, 后续的 MV 隐写分析工作将集中针对 P 帧展开。

4 相关性异常的 MV 隐写分析检测

在视频中, 由于物体内运动具有趋同性, 而物体通常由多个块所刻画, 故相邻块间的 MV 存在相似性. 秘密信息嵌入会削弱 MV 相关性, 本文通过度量 MV 相关性异常实现 MV 隐写分析检测。

4.1 适用于可变尺寸块的四向扫描方法

H.264 采用本文 3.1 节介绍的可变尺寸块方法实现块匹配, 导致任意子块的接壤块数不确定. 接壤块数

的变化将影响运动矢量分块的空间位置关系的确定. 为度量相邻块间 MV 相关性, 必须设计合理的扫描方法, 将二维运动矢量场的空间相关性转换为一维运动矢量链的链条间元素的相关性。

如图 3 所示, 图 3(a) 代表适用于可变尺寸块的水平向右扫描方式, 贴着各宏块上边沿以从左至右的方式按行扫描图阴影所标记的块, 将每帧的 MV 扫描生成一个水平向右的 MV 扫描链. 最终通过可变尺寸块四向扫描方法生成四个方向 MV 扫描链。

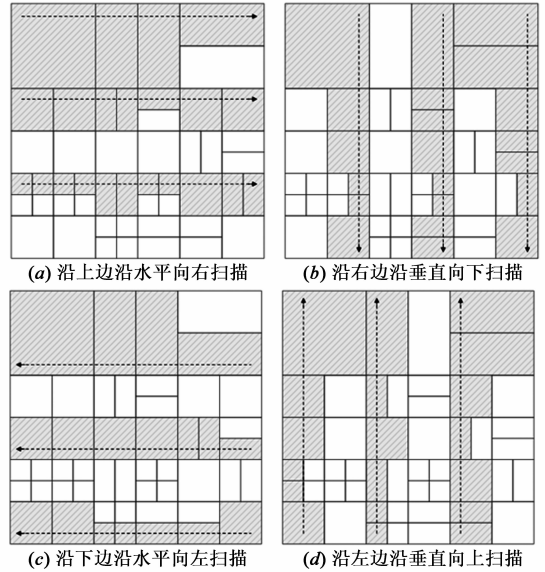


图 3 适用于可变尺寸块的四向扫描方法

以图 4 为例, 依据文献[5]满嵌秘密信息后(阈值为 3), 计算其原始载体 Nonstego 与隐秘载体 Stego 的 MV 分量四向扫描链的前后差分直方图。



图 4 Flower 视频中帧图像以及对应运动矢量

如图 5 所示, 秘密信息的嵌入破坏了相邻块之间 MV 的相关性(横坐标为差值大小, 纵坐标为对应差分值的统计概率). 由于 MV 嵌入对其两个分量相关性影响程度不一致, MV 水平分量差值分布坡度变缓, 而 MV 垂直分量差值没有明显变化. 为提升特征敏感度, 本文设计了 MV 分量差异性计算方法, 选择差异性更加明显的 MV 分量作为检测对象。

4.2 基于 NMI 的 MV 分量差异性计算

互信息用来反映两个变量 X 和 Y 之间的相关性,

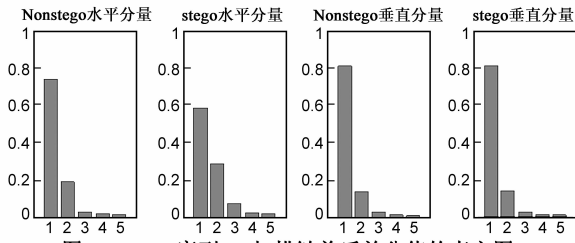


图5 Flower序列MV扫描链前后差分值的直方图

两个随机变量间的规范化互信息(Normalized Mutual Information, NMI)定义为^[17]:

$$NMI = 1 - \frac{I(X, Y)}{\sqrt{H(X)H(Y)}} \quad (1)$$

其中互信息 $I(X, Y) = \sum_{x, y} p(x, y) \log \frac{p(x, y)}{p(x)p(y)}$,

$H(X)$ 和 $H(Y)$ 表示两个随机变量的熵值. 本文将MV扫描链上位置 i 与位置 $i+1$ 上的MV分量值分别记做事件 X 和事件 Y .

定义1 第 k 个帧对应MV分量的NMI值:

$$NMI(k) = 1 - \frac{\sum_{x=1}^{L-1} \sum_{y=1}^{L-1} p(x, y) \log \frac{p(x, y)}{p(x)p(y)}}{\sqrt{\sum_{x=1}^{L-1} p(x) \log p(x) * \sum_{y=1}^{L-1} p(y) \log p(y)}} \quad (2)$$

对数以2为底, L 为MV扫描链长度, $p(x)$ 表示扫描链第 i 个位置上MV分量为 x 的频率, $p(y)$ 表示扫描链第 $i+1$ 个位置上MV分量为 y 的频率, $p(x, y)$ 表示扫描链相邻两个MV分量分别为 x 和 y 的频率. 规定 $x \log(x/0) = 0, 0 \log(0/x) = 0$.

NMI值位于0和1之间,NMI值越大表示相邻MV相关性越差. 通过计算第 k 帧水平方向和垂直方向的NMI值,两个分量中NMI值大的分量MV隐写对其相关性破坏更为严重,即可在该分量上进行特征提取,从而提高检测特征的敏感度.

4.3 基于共生频率异常MV相关性度量方法

秘密信息嵌入会改变相邻块MV的关联分布特性,导致两个具有空间关系的块的MV分量的联合概率密度出现异常. 因此可通过计算两个空间距离为 r 的块 (B_{x_1}, B_{y_1}) 与 (B_{x_2}, B_{y_2}) 所对应的MV分量间的共生频率 C ,实现MV隐写分析检测.

定义2 MV分量的共生频率 C :

$$C_{\text{hor}}(n, m, r) = |\{(B_{x_1}, B_{y_1}), (B_{x_2}, B_{y_2}) \in Q: G_{\text{hor}}(B_{x_1}, B_{y_1}) = n, G_{\text{hor}}(B_{x_2}, B_{y_2}) = m\}| \quad (3)$$

$$C_{\text{ver}}(n, m, r) = |\{(B_{x_1}, B_{y_1}), (B_{x_2}, B_{y_2}) \in Q: G_{\text{ver}}(B_{x_1}, B_{y_1}) = n, G_{\text{ver}}(B_{x_2}, B_{y_2}) = m\}| \quad (4)$$

其中 $C_{\text{hor}}(n, m, r)$ 和 $C_{\text{ver}}(n, m, r)$ 分别代表第 k 帧的MV水平和垂直分量共生频率, Q 代表该帧所包含的所

有块, $|\{\dots\}|$ 指集合的基数,函数 $G_{\text{hor}}(x, y)$ 表示提取位置为 (x, y) 的块的水平MV分量,函数 $G_{\text{ver}}(x, y)$ 表示提取位置为 (x, y) 块的垂直MV分量, n 和 m 表示MV分量值的大小.

4.4 MV相关性异常的特征提取算法

视频尺寸为 $\text{width} \times \text{height}$,第 k 个P帧中各像素的MV值存放在水平分量 $MV_{\text{hor}_k}(\text{width}, \text{height})$ 和垂直分量 $MV_{\text{ver}_k}(\text{width}, \text{height})$ 中,各宏块类型 MB_type 存放在 $MB_type_k(\text{width}/16, \text{height}/16)$ 中,各宏块中第 sub_N 个子块的子宏块划分方式SMB存放在 $SMB_k(\text{width}/16, \text{height}/16, sub_N)$ 中. 具体的 MB_type 和SMB值如下表3所示.

表3 各块类型对应的 MB_type 和SMB值

宏块类型	MB_type 值	SMB值
Inter_P16x16	Read_MV	0
Inter_P16x8	Read_MV	0
Inter_P8x16	Read_MV	0
Inter_SMB_8x8	Read_MV	SMB_8x8
Inter_SMB_8x4	Read_MV	SMB_8x4
Inter_SMB_4x8	Read_MV	SMB_4x8
Inter_SMB_4x4	Read_MV	SMB_4x4
Inter_PSkip	P_Skip	0
Intra	Intra	0

4.4.1 MV四向邻接差分链构造算法

用符号 $\{\rightarrow, \downarrow, \leftarrow, \uparrow\}$ 代表可变尺寸块四向扫描方法的四个方向,用 $D^{\rightarrow}, D^{\downarrow}, D^{\leftarrow}, D^{\uparrow}$ 代表对应四个方向扫描生成的四向邻接差分链. 邻接差分链 D 构造算法见算法1.

算法1 四向邻接差分链构造

输入:H.264视频;输出:邻接差分链 D^P

参数说明: \leftarrow 赋值操作;方向 $P \in \{\rightarrow, \downarrow, \leftarrow, \uparrow\}$

函数说明:

$Dg(MV_k, P)$:将第 k 帧的候选MV分量以图3所示的方法按照方向 P 生成扫描链

$\text{Length}(X)$:计算数组 X 的长度

1. FOR EACH P帧 in H.264 DO:

2. 解码第 k 个P帧来获得 MB_type_k, SMB_k ,

按照情形1、情形2、情形3获取 $MV_{\text{hor}_k}, MV_{\text{ver}_k}$

3. IF $NMI_{\text{ver}}(k) > NMI_{\text{hor}}(k)$ THEN:

4. 候选 $MV_k = MV_{\text{ver}_k}$

5. ELSE:

6. 候选 $MV_k = MV_{\text{hor}_k}$

```

7.  END IF
8.  FOR EACH 四向扫描方向  $P \in \{\rightarrow, \downarrow, \leftarrow, \uparrow\}$  DO:
9.    MV 扫描链  $S_k^P = Dg(MV_k, P)$ 
10.    $s \leftarrow 0$ 
11.   WHILE  $s < (\text{Length}(S_k^P) - 1)$  DO:
12.    计算 MV 邻接差分链  $D_k^P$ 
        $D_k^P(s) = S_k^P(s+1) - S_k^P(s)$ 
        $s = s + 1$ 
13.   END
14. END
15. END

```

算法 1 中解码视频获取的第 k 帧的宏块类型和子块划分方法,存放在 MB_type_k 和 SMB_k 中.对于不同的块类型,按照情形 1、情形 2 和情形 3 计算第 k 帧的 MV,然后对比水平 NMI 值 $NMI_{hor}(k)$ 和垂直 NMI 值 $NMI_{ver}(k)$ 确定该帧的候选 MV,最后利用图 3 所示扫描方法获取扫描链 S_k^P ,最后通过前后差分得到 MV 的邻接差分链 D_k^P .

4.4.2 计算归一化运动矢量共生矩阵特征集

算法 2 对于邻接差分链 D_k^P 通过基于共生频率异常的 MV 相关性度量方法,依据不同方向 P 以及不同距离 R 计算获得四个尺寸为 $[2T+1, 2T+1, R]$ 的三维 MV 共生矩阵特征集 C_k^P .

算法 2 计算第 k 帧的归一化 MV 共生矩阵特征

输入:第 k 帧的四向邻接差分链 D_k^P

输出:第 k 帧的四向归一化 MV 共生矩阵 C_k^P

参数说明: R 为定义的共生矩阵中考虑的最大空间间距离

T 为 MV 邻接差分中设定的最大差分阈值

函数说明: $p(D_k^P(s) = n, D_k^P(s+r) = m)$ 邻接差分链中位置相距为 r 的两个 MV 分别为 n 和 m 的联合概率:

$$= \frac{\sum_{s=0}^{\text{Length}(D_k^P)-1} \delta(D_k^P(s) = n, D_k^P(s+r) = m)}{\text{Length}(D_k^P) - r}$$

其中 $\delta(x, y)$ 是脉冲函数:

$$\delta(x = n, y = m) = \begin{cases} 1, & x = n \text{ 和 } y = m \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

初始化: $C_k^P(n, m, r) \leftarrow \emptyset$

```

1. FOR EACH  $r \in R$  DO:
2.  FOR EACH  $n, m \in [-T, T] \& s < \text{length}(D_k^P) - r$  DO:
3.     $C_k^P(n, m, r) = p(D_k^P(s) = n, D_k^P(s+r) = m)$ 
4.  END
5. END

```

4.4.3 特征组合

将共生矩阵特征集 C_k^P 组合得到特征集合 $F = [C_k^{\rightarrow} C_k^{\downarrow} C_k^{\leftarrow} C_k^{\uparrow}]$,特征中参数 $R = 2, T = 3$,故本文所使用的 MV 隐写分析特征维数为 392 维.

5 实验和讨论

5.1 MV 隐写分析实验

实验使用的标准序列如表 4 所示,编码器为 X264, GOP 设定为 [I, P, P, P, P, P, P],采用六边形快速搜索算法,运动补偿精度为四分之一像素精度, I 帧 P 帧的预测误差图像的量化参数分别为 23 和 26,解码器为 JM18.0,分类器为 Lib-SVM.在视频样本制作方面,将表 4 中 13 个视频以 30 帧每段裁剪为 115 个无重复的视频样本片段,组成视频样本集合.分别用 Xu^[5]、Aly^[8]、Cao^[9] 隐藏算法以四种嵌入率制作 Stego 样本 (bpf: 平均每帧嵌入的比特数).为对算法性能进行比较,本文在相同实验环境下对 Cao^[12] 方法和 Deng^[13] 方法在 H.264 视频编解码环境中进行仿真,随机抽取 30% 为训练样本,检测剩余测试样本,实验随机抽样 10 次,取平均值为最终检测结果,实验结果见表 5.

表 4 VQEG、CIPR 标准测试序列的详细参数

视频序列	尺寸大小	帧数	相机运动	物体运动
bus	288 × 352	150	平移	平移
city	288 × 352	300	环绕移动	静止
coastguard	288 × 352	300	平移	平移
flower	288 × 352	300	平移	静止
football	288 × 352	260	平移	杂乱
foreman	288 × 352	300	平移、抖动	杂乱
mobile	288 × 352	300	平移、缩放	平移
silent	288 × 352	300	静止	杂乱
soccer	288 × 352	300	平移、缩放	杂乱
stefan	240 × 352	300	平移、缩放	杂乱
tempete	288 × 352	260	缩放	杂乱
tennis	240 × 352	150	缩放、平移	镜头切割
waterfall	288 × 352	260	缩放	平移

如表 5 所示,真阳性率 TP 表示隐秘视频中所有 P 帧检测为 Stego 帧的比例、真阴性率 TN 表示原始视频中所有 P 帧检测为 Nonstego 帧的比例.本文所提出的方法能够较好的控制 MV 隐写分析检测的虚警率和漏检率.从结果可看出,本文方法能对 H.264 视频 MV 隐藏实现有效的隐写分析检测.

图 6 对比了各检测算法在 300bpf 嵌入强度下检测的 (Receiver Operating Characteristic) ROC 曲线 (纵坐标为真阳性率 TP,横坐标为假阳性率 TN).

如图 7 所示,横坐标为平均每宏块嵌入比特数 bpMB (bit per Macro-Block),纵坐标为平均决策错误率 $MED(P_E) = 1/2(FP + FN)$ 其中 FP 为原始视频帧被错判为 Stego 的比例, FN 为隐秘视频帧被错判为 Nonstego 的

比例.从结果可看出,针对表 4 中 YUV 序列、1280 × 720 的 iPhone 视频和 1920 × 1080 的高清 DV 视频,本文方

法均能有效检测.在相同嵌入密度下,本文方法的正检率随着视频尺寸增大而提高.

表 5 本文方法和 Deng、Cao 隐写分析方法的检测率对比

嵌入率 bpf	Xu 隐藏算法			Aly 隐藏算法			Cao 隐藏算法			
	Deng 方法	Cao 方法	本文方法	Deng 方法	Cao 方法	本文方法	Deng 方法	Cao 方法	本文方法	
500bpf	TN	82.28%	82.23%	95.40%	78.03%	78.02%	92.96%	76.92%	55.42%	87.64%
	TP	87.31%	89.12%	92.90%	60.63%	73.80%	91.62%	47.79%	68.68%	85.12%
400bpf	TN	65.69%	66.79%	92.30%	73.56%	68.73%	90.76%	72.51%	55.05%	85.52%
	TP	79.51%	78.91%	90.95%	54.84%	68.97%	87.45%	44.51%	59.48%	81.07%
300bpf	TN	61.34%	64.54%	89.29%	72.35%	66.79%	88.22%	70.49%	52.53%	81.57%
	TP	72.74%	67.82%	88.78%	53.11%	68.84%	87.69%	40.73%	57.85%	78.94%
200bpf	TN	57.28%	61.92%	84.77%	71.19%	67.64%	87.46%	70.62%	54.69%	78.33%
	TP	72.93%	66.44%	87.57%	44.92%	67.02%	83.57%	41.49%	56.41%	74.73%

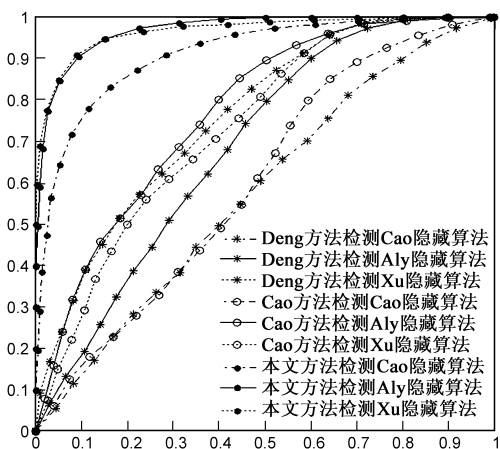


图 6 300bpf 下各隐写分析方法的 ROC 曲线

表 6 校准中宏块类型改变比

H. 264 视频类型	改变比例
500bpf 隐秘视频	27.35%
400bpf 隐秘视频	26.01%
300bpf 隐秘视频	24.64%
200bpf 隐秘视频	21.73%
原始视频	20.48%

现有 MV 隐写分析方法通常采用 MV 校准技术估计出原始 MV 从而构造差异化特征.但在 H. 264 标准中,由于预测误差图像采用有损量化编码,导致编码前后视频存在量化带来的误差.这种误差将改变 MV 校准重编码中某些块的宏块类型和最优宏块划分方式.表 6 统计了实验样本库中视频重编码前后宏块类型和最优宏块划分模式发生改变的宏块比,即使针对原始视频,

20.48% 的宏块出现了类型改变的现象.随着嵌入强度的增加,宏块类型的改变比例不断上升.校准前后宏块类型的改变将直接影响 MV 校准的准确性,并将影响 MV 的隐写分析检测.

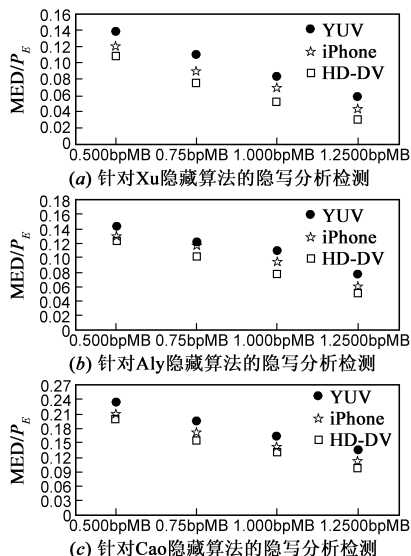


图 7 本文方法针对各种来源视频检测结果

5.2 检测时间开销对比

表 7 对比了三种不同尺寸的视频(各 5000 帧)在监测过程中所耗时间和总检测时间(CPU 为 Intel Core i5-3470,主频为 3.2GHz).虽然本文方法特征维数高,分类器先验训练和判别的时间开销大,但特征提取阶段所需时间较少.这是因为采用 MV 校准技术的隐写分析方法,需要对视频进行 1 次重编码和 2 次解码,在校准阶段耗费了大量时间.而本文方法只需 1 次解码,特征提取时间较短,节省了 MV 隐写分析过程所需总时间开

销,更贴近实际应用中隐写分析检测的实时性需求。

表 7 本文、Deng 以及 Cao 隐写分析方法的分类器训练和隐写分析检测的时间开销

视频内容	检测方法	特征维数	分类器 训练时间	隐写分析检测阶段所需时间开销			
				校准时间	特征提取时间	分类判别时间	隐写分析总时间
YUV 352 × 288	Deng	3 维	1s	16s	10min40s	1s	10min57s
	Cao	15 维	2s	17s	20min29s	2s	20min48s
	本文	392 维	23s	无	8min03s	20s	8min23s
iPhone 1280 × 720	Deng	3 维	1s	2min23s	13min04s	1s	15min28s
	Cao	15 维	2s	2min27s	22min24s	2s	24min54s
	本文	392 维	23s	无	9min04s	20s	9min24s
HD-DV 1920 × 1080	Deng	3 维	1s	2min47s	18min30s	1s	22min28s
	Cao	15 维	2s	2min50s	31min32s	2s	34min24s
	本文	392 维	23s	无	9min27s	20s	9min47s

6 结论

本文提出了一种基于相关性异常的 H.264 视频的 MV 隐写分析方法;为解决 H.264 视频中复杂的宏块类型以及可变大小的尺寸块对 MV 隐写分析的影响,设计了适用可变尺寸块的四向扫描方法;通过计算 MV 分量的差异性 NMI 值,提升了分析特征集合的敏感度;在此基础上提出基于共生频率异常的 MV 相关性度量方法,构建 392 维的特征集合,从而实现 H.264 视频的 MV 隐写分析检测.实验证明,该方法在 H.264 下具有检测率高、检测速度快特点.后续研究方向:(1)针对 H.264 视频中 B 帧隐藏设计有效的检测策略;(2)设计更加敏感特征和适用于 H.264 视频隐写分析的 MV 校准方法.

参考文献

- [1] 胡洋,张春田,苏育挺.基于 H.264/AVC 的视频信息隐藏算法[J].电子学报,2008,36(4):690-694.
Hu Y, Zhang C T, Su Y T. Information hiding for H.264/AVC [J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(4): 690-694. (in Chinese)
- [2] Jing H, He X, Han Q, et al. Motion vector based information hiding algorithm for H.264/AVC against motion vector steganalysis[A]. Proceedings of the 4th Asian Conference on Intelligent Information and Database Systems [C]. Kaohsiung: Springer Verlag, 2012. 91-98.
- [3] 徐甲甲,张卫明,俞能海,等.一种基于秘密共享与运动矢量的视频水印算法[J].电子学报,2012,40(1):8-13.
Xu J J, Zhang W M, Yu N H, et al. A video watermarking algorithm based on secret sharing and motion vectors[J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(1): 8-13. (in Chinese)
- [4] Jordan F, Kutter M, Ebrahimi T. Proposal of A Watermarking Technique for Hiding/Retrieving Data in Compressed and De-

compressed Video [R]. ISO/IEC Doc, JTC1/SC29/WG11, 1997.

- [5] Xu C Y, Ping X J, Zhang T. Steganography in compressed video stream[A]. Proceedings of the First International Conference on Innovative Computing, Information and Control [C]. Beijing: IEEE, 2006. 269-272.
- [6] Pan F, Xiang L, Yang X Y, et al. Video steganography using motion vector and linear block codes[A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Software Engineering and Service Sciences [C]. Beijing: IEEE, 2010. 592-595.
- [7] Hao B, Zhao L Y, Zhong W D. A novel steganography algorithm based on motion vector and matrix encoding[A]. Proceedings of the IEEE 3rd International Conference on Communication Software and Networks [C]. Xi'an: IEEE, 2011. 406-409.
- [8] 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.
- [9] Cao Y, Zhao X F, Feng D G, et al. Video steganography with perturbed motion estimation[A]. Proceedings of the 13th Information Hiding Conference [C]. Prague: Springer Verlag, 2011. 193-207.
- [10] Fridrich J, Goljan M, Soukal D. Perturbed quantization steganography with wet paper codes[A]. Proceedings of the Workshop on Multimedia & Security [C]. Magdeburg: ACM, 2004. 4-15.
- [11] Su Y T, Zhang C Q, Zhang C T. A video steganalytic algorithm against motion-vector-based steganography[J]. Signal Processing, 2011, 91(8): 1901-1909.
- [12] Cao Y, Zhao X F, Feng D G. Video steganalysis exploiting motion vector reversion-based features[J]. IEEE Signal Process, 2012, 19(1): 35-38.
- [13] Deng Y, Wu Y J, Zhou L N. Digital video steganalysis using motion vector recovery-based features[J]. Applied Optics,

2012, 51(20):4667 – 4677.

- [14] Lin T L, Lai C K, Yang N C. Efficient pixel-based motion vector recovery in H.264[A]. Proceedings of the IEEE Intelligent Symposium on Intelligent Signal Processing and Communications Systems[C]. New Taipei City: IEEE, 2012. 355 – 360.
- [15] 王朔中, 张新鹏, 张卫明. 以数字图像为载体的隐写分析研究进展[J]. 计算机学报, 2009, 32(7): 1247 – 1263.
Wang S Z, Zhang X P, Zhang W M. Recent advances in image-based steganalysis research[J]. Chinese Journal of Computer, 2009, 32(7): 1247-1263. (in Chinese)
- [16] Wiegand T, Sullivan G J, Bjontegaard G, et al. Overview of the H.264/AVC video coding standard[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2003, 13(7): 560 – 576.
- [17] Estévez P A, Tesmer M, Perez C A, et al. Normalized mutual information feature selection[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2009, 20(2): 189 – 201.

作者简介



王丽娜 女, 1964 年 10 月出生, 辽宁营口人. 教授, 博士生导师, 武汉大学计算机学院副院长, 空天信息安全与可信计算教育部重点实验室主任, 主要研究方向: 多媒体内容安全、信息隐藏、云计算安全等.



王旻杰(通信作者) 男, 1989 年 9 月出生, 湖南娄底人. 2010 年获武汉大学工学学士学位, 现为武汉大学计算机学院博士研究生, 主要研究方向: 多媒体内容安全、信息隐藏.

E-mail: whuwmj@gmail.com.

翟黎明 男, 1988 年 10 月出生, 河南新乡人. 武汉大学计算机学院博士研究生, 研究方向: 信息隐藏.

任延珍 女, 1973 年 1 月出生, 陕西延安人. 武汉大学计算机学院副教授, 研究方向: 多媒体内容安全.