

基于块内块间相关性的 MP3 隐写分析特征

王运韬^{1,2} 杨坤^{1,2} 易小伟^{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, 100093;

2. 中国科学院大学网络空间安全学院, 北京, 100093)

摘要: 针对当前 MP3 隐写分析通用性不足等问题, 本文提出一种基于 MDCT 量化系数块内块间相关性的 MP3 通用隐写分析特征. 通过利用 MP3 编码器对 QMDCT 系数进行成对分组编码的特点, 论文引入 2×2 分块均值 Markov 特征来提高隐写对块内和块间量化系数相关性的区分度, 以弥补传统帧内帧间 Markov 特征的不足. 采用 SVM 分类器对提取特征进行分类训练, 实验结果表明本文算法可对 MP3Stego 和 Huffman 码字映射等多种 MP3 隐写算法进行检测, 盲检测准确率达 90%以上, 同最新已有隐写分析算法相比检测准确率提高了至少 2%.

关键词: MP3隐写分析; 盲隐写分析; Markov特征; SVM

中图分类号: TN915.08 doi:10.3969/j.issn.1000-565X.

1 引言

音频应用在日常生活中的普及推动了音频隐写技术和隐写分析技术的不断发展. MP3 音频以其高压缩率和高品质音质的特性, 成为传播最广泛的音频格式之一. 相比于 WAV 格式的音频, MP3 编码原理更为复杂, 隐蔽性更强, 成为当前主要的音频隐写载体.

近年来出现了多种 MP3 音频隐写算法和隐写分析算法. MP3 隐写根据嵌入操作发生的位置可以分为前置式、内置式和后置式隐写三类, 其中内置式隐写与 MP3 编码相结合, 普遍具有隐蔽性高和隐写容量大的特点, 是当前 MP3 音频隐写算法的主要研究方向. MP3Stego^[1]是一款开源的音频隐写算法, 该算法在 MP3 编码的内循环中, 通过调整量化步长来修改 Part_2_3_length 实现秘密消息的嵌入. 严迪群等人^[2]提出一种基于码字替换的信息隐写算法, 对 Huffman 码表中的码字进行分类, 在替换操作不改变 MP3 码流固定结构的前提下, 通过码字替换实现隐写消息的嵌入. 张垚等人^[3]提出一种基于 MP3 后置式的自适应隐写算法, 根据嵌入隐写消息的长度以及 Hb 码表小值区码字数目, 自适应选取嵌入位置, 通过改变载体码字的末位数值实现隐写消息的嵌入. 另外, 张垚等人^[4]又提出一种基于 MP3 的内嵌型自适应隐写算法, 根据隐写消息

的奇偶性与码表序号的奇偶性实现隐写消息的嵌入, 嵌入容量相比于 MP3Stego 提升了 3 倍. Yang 等人^[5]提出一种基于等长熵码字替换的自适应 MP3 隐写算法, 结合心理声学模型进行代价函数的构造, 在 128kbps 码率和 0.25 相对嵌入率下检测准确率低于 55%.

MP3 音频隐写分析算法可分为专用隐写分析和通用隐写分析. Westfeld^[6]最早展开对 MP3Stego 隐写分析算法的研究, 他通过对 part_2_3_length 的统计分析, 发现隐写前后块长度方差有较大变化, 基于此实现对 MP3Stego 算法的隐写分析. Qiao 等人^[7]提出一种基于 MDCT 量化系数(Quantized Modified Discrete Cosine Transform, QMDCT)二阶统计特性、Markov 转移概率以及邻域密度分析值的联合特征分析算法, 可以有效对 MP3Stego 算法检测分析, 但复杂度相对较高. 万威等人^[8]通过使用 Huffman 码表特征, 有效地反映了 MP3Stego 隐写造成的块间量化不均匀现象, 并由此提出一种基于码表分布特征和重编码校准的 MP3Stego 隐写分析算法. Yan 等人^[9]发现, MP3 音频通过 MP3Stego 算法隐写后, 比特池长度会发生变化, 由此提出一种基于比特池统计特性的 MP3Stego 隐写分析算法. Jin 等人^[10]提出一种基于 QMDCT 系数的一阶 Markov 转移概率的隐写分析算法, 可有效实现对 MP3Stego 隐写算法在低嵌入率条件下的隐写分析.

基金项目: 国家自然科学基金课题(U1636102, U1536105), 国家重点研发计划课题(2016YFB0801003, 2016QY15Z2500)

作者简介: 王运韬, 男, 1993 年生, 硕士生, 研究方向为多媒体处理与安全, E-mail: wangyuntao2@iie.ac.cn

杨坤: 男, 1992 年生, 硕士生, 研究方向为多媒体处理与安全, E-mail: yangkun9076@iie.ac.cn

易小伟: 博士, 助理研究员, 研究方向为多媒体处理与安全, E-mail: yixiaowei@iie.ac.cn

赵险峰: 博士, 研究员, 博士生导师, 研究方向为信息隐藏, 多媒体安全与取证, E-mail: zhaoxianfeng@iie.ac.cn

在通用隐写分析中,汪云路等人^[11]提出一种基于组合质量评估参数的音频隐写分析算法,对 DSSS 和常用的 FFT、DCT 以及 DWT 等变换域隐写算法有较好的检测效果. Hamzeh 等人^[12]通过提取音频信号及其二阶差分信号的 R-MFCC 系数,以其均值、标准差、偏度和峰度等一阶统计量为特征实现音频的隐写分析,对 DSSS、Hide4PGP、Steghide 隐写算法的检测准确率在 98%以上,但不能完全适用于压缩域音频隐写分析. Ren 等人^[13]提出一种基于帧内、帧间 QMDCT 差分系数 Markov 转移概率和邻域累积联合密度的音频隐写分析算法,可以很好地实现对 AAC 音频的隐写分析. 此外,深度学习也开始逐步应用到音频隐写分析中, Catherine 等人^[14]提出一种以深度信念网络(Deep Belief Network, DBN)为分类器的音频隐写分析,可实现 StegHide、Hide4PGP 和 FreqSteg 三种隐写算法的检测分析,性能优于以 SVM 和 GMM 为分类器的检测效果. Chen 等人^[15]提出一种基于 CNN 的时域隐写分析算法,用于检测时域音频的 ± 1 LSB 隐写,但尚不具备通用性.

针对已有音频隐写分析特征通用性不足等问题,本文分析了 MP3 隐写算法对音频时域和频域统计特性的影响,提出一种基于 QMDCT 系数块内块间相关性的 MP3 通用隐写分析特征. 提取 MP3 音频 QMDCT 系数,计算矩阵 M_{QMDCT} 和 M_{AQMDCT} 行列方向上的 Markov 转移概率与 2×2 分块均值 Markov 转移概率,通过 SVM 分类器对所提特征进行训练分类,可以实现多码率、多种相对嵌入率条件下的较高检测率分析.

下文将分为四个部分依次进行描述,具体组织结构如下:第2节介绍和回顾了MP3编码原理、Huffman码字结构及当前主要的音频通用隐写分析特征,第3节是本文所提算法原理的描述,第4节为特征优选和实验结果与分析,最后是结论与展望.

2 相关内容回顾

2.1 MP3 编码原理与码流结构

根据 ISO/IEC 11172-3 标准^[16],MP3 编码过程如图 1 所示,编码后的 MP3 音频文件由音频帧(frame)组成,每帧包含两个颗粒(granule),每个颗粒内有一个或多个声道(channel),本文分析的 MP3 音频文件均为双声道.

1. 多相分析滤波:对原始时域采样值进行滤波并将其转换为 32 个子带信号,通过 MDCT 变换,在每个子带内划分出 18 个次子带,最终得到 576 个系数的频域信号;

2. 心理声学模型:通过信掩比(signal-to-mask ratio, SMR)等心理声学模型控制压缩比率,保持听

觉上不可察觉;

3. 量化编码:通过 MDCT 系数量化和 Huffman 编码得到二进制比特流. 其中,外循环通过掩蔽阈值控制量化噪声得到量化系数,内循环选取最优的 Huffman 码表对 MDCT 量化系数值进行编码;

4. 比特流格式化:将信号与边信息封装为 MP3 码流输出.

在 MP3 音频文件中,每个声道包含 576 个频域系数,即 QMDCT 系数,该系数按频率由低到高依次为大值区(big_value)、小值区(count1)和零区(rzero),如图 2 所示.

1. 大值区系数较大,每个 Huffman 码字对应两个系数 $\langle x, y \rangle$,其码流结构如图 3 所示. 如果系数值为零,则不指定符号位. 如果系数值超过 15,则超出的部分由 linbits 位表示.

2. 小值区系数为-1, 0, 1, 每 4 个系数对应一个 Huffman 码字,码流结构如图 4 所示. 小值区无 linbits 位,其余部分与大值区完全相同.

3. 零区的系数都为 0,无需编码.

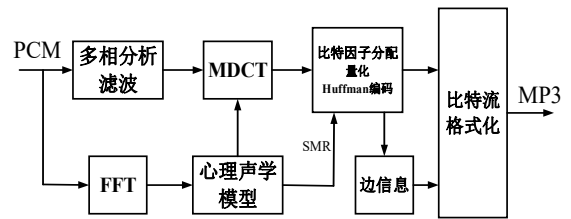


图 1 MP3 编码流程图

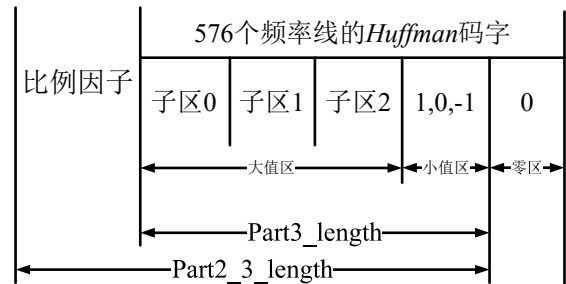


图 2 QMDCT 系数结构图

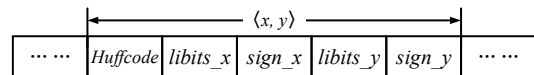


图 3 大值区码字结构图

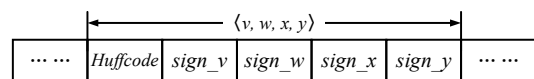


图 4 小值区码字结构图

2.2 音频隐写分析特征

本节将对近年来在压缩域音频通用隐写分析中检测率较高的两种特征进行简要描述, 分别为帧内帧间 Markov 转移概率特征(Jin-Markov) [10]和帧内帧间 Markov 转移概率与邻域累积联合密度的组合特征(Markov-ANJD) [13].

2.2.1 Jin-Markov 特征

Jin 等人 [10]提出一种基于 QMDCT 系数帧内帧间 Markov 特征的 MP3 隐写分析算法, 逐帧提取 MP3 音频信号的 QMDCT 系数, 计算其行差绝对值矩阵 M_{AQMDCT} 的帧内帧间 Markov 转移概率, 截断阈值 $T = 6$, 经过特征优选, 得到一组 19 维的特征, 可同时实现对 64、96、128、160、192kbps 比特率下的 MP3Stego 算法的隐写分析. 该特征在 128kbps, 10%相对嵌入率条件下的 MP3Stego 隐写算法分析中检测准确率达 92.5%.

2.2.2 Markov-ANJD 特征

Ren 等人 [13]提出一种基于帧内帧间 Markov 转移概率与邻域累积联合密度的组合特征, 逐帧提取 MP3 音频信号的 QMDCT 系数, 分别计算其一阶二阶行列差分矩阵 M_1^{inter} 、 M_1^{intra} 、 M_2^{inter} 、 M_2^{intra} 的 Markov 转移概率与邻域累积联合密度, 以此为特征进行分类训练, 截断阈值 $T = 4$, 特征维度 1296, 对 128kbps 的 AAC 音频文件, 在相对嵌入率为超过 50%时, 检测准确率达 85.34%以上.

3 算法原理

3.1 隐写对 QMDCT 系数影响分析

QMDCT 系数是 MP3 音频编码过程中十分重要的参数, 隐写信息的嵌入过程将会破坏系数的统计特性. MP3Stego 是经典的 MP3 隐写算法, 通过调整量化步长实现隐写消息的嵌入, 量化步长的增大会导致 QMDCT 系数减小, 如公式(1)所示,

$$y(i) = nint \left(\left(\frac{|x(i)|}{\sqrt[4]{2^s}} \right)^{\frac{3}{4}} - 0.0946 \right) \quad (1)$$

其中, $x(i)$ 为 MDCT 系数, $y(i)$ 为 QMDCT 系数, s 为量化步长.

HCM 算法、EECS 算法等是通过 Huffman 码字替换实现隐写消息嵌入的, 由 2.1 节可以看出, Huffman 码字与 QMDCT 系数具有映射关系, 即, 对 Huffman 码字的替换其本质就是对 QMDCT 系数

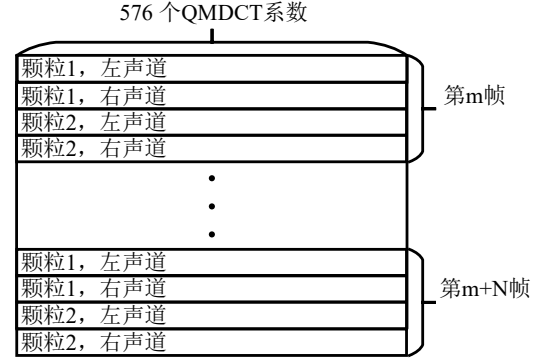


图 5 QMDCT 矩阵结构图

的修改. 因此, 内置式 MP3 隐写算法其本质上均为对 QMDCT 系数的修改, 所以本文以 QMDCT 系数在隐写前后的统计特性变化为依据进行隐写分析.

3.2 QMDCT 系数预处理

音频信号不同于图像和视频, 其本身为一维信号, 因此在处理过程中我们需按照一定规则将其拼接成二维矩阵, 方便处理和分析, 如按照采样点进行等长交叠划分或按照音频帧逐帧进行拼接. 本文对 MP3 音频信号进行部分解码, 以声道为最小单位对 QMDCT 系数进行重组, 将其拼接为 $4N \times L$ 形式的矩阵, N 为窗口大小, 即音频帧总数, L 为声道内 QMDCT 系数的个数, $L \leq 576$, 格式如图 5 所示. 为保证以下实验的合理性, 基于控制变量原则, 本文所提算法与其比较算法中 L 均为 576.

QMDCT 系数矩阵 M_{QMDCT} 和其绝对值矩阵 M_{AQMDCT} 表达式分别如(2)(3)所示,

$$M_{QMDCT} = \begin{pmatrix} Q_{1,1} & \cdots & Q_{1,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Q_{m,1} & \cdots & Q_{m,n} \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$M_{AQMDCT} = \begin{pmatrix} AQ_{1,1} & \cdots & AQ_{1,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ AQ_{m,1} & \cdots & AQ_{m,n} \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$AQ_{m,n} = |Q_{m,n}| \quad (4)$$

其中, m 和 n 分别表示矩阵的行数和列数, 且 $m \in [1, 200]$, $n \in [1, 576]$, $Q_{m,n} \in [-T, T]$, $AQ_{m,n} \in [0, T]$, T 为截断阈值.

$$\delta(m, n) = \begin{cases} \delta(m, n) & |\delta(m, n)| < T \\ T & otherwise \end{cases} \quad (5)$$

3.3 帧内帧间 Markov 特征

帧内帧间 Markov 特征用以获取声道内与声道间 QMDCT 系数之间的相关性. 根据公式(6)(7), 计算 M_{QMDCT} 和 M_{AQMDCT} 矩阵的行列方向上的 Markov 转移概率矩阵 P_{gh} 、 P_{gv} 和 $P_{A_{gh}}$ 、 $P_{A_{gv}}$.

$$\text{row: } p\{M(s+1, t) = y | M(s, t) = x\} = \frac{\sum \delta\{M(s, t) = x, M(s+1, t) = y\}}{\sum M(s, t) = x} \quad (6)$$

$$\text{col: } p\{M(s, t+1) = y | M(s, t) = x\} = \frac{\sum \delta\{M(s, t) = x, M(s, t+1) = y\}}{\sum M_h(s, t) = x} \quad (7)$$

其中,

$$\delta(X = x, Y = y) = \begin{cases} 1 & X = x, Y = y \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (8)$$

3.4 分块均值 Markov 特征

由 2.1 节 MP3 码字结构可知, 在 MP3 音频文件中, 每个颗粒包含两个声道, 每个 Huffman 码字对应一对 QMDCT 系数. 帧内帧间 Markov 特征仅考虑了行列方向上相邻系数之间的相关性变化, 而在码字替换类隐写算法中, 每一次 Huffman 码字的更改都对应着两个或四个 QMDCT 系数的改变. 因此, 利用 MP3 编码器对 QMDCT 系数进行成对分组编码的特点, 本文进一步引入了分块均值 Markov 特征, 用以度量不同码字对应位置上 QMDCT 系数之间的相关性.

QMDCT 系数相关性分析原理如图 6 所示. g 表示颗粒, c 表示声道, h 表示 Huffman 码字, x 和 y 表示码字对应 QMDCT 系数. 其中, 实线表示帧内帧间 Markov 转移概率分析, 虚线表示分块 Markov 转移概率分析.

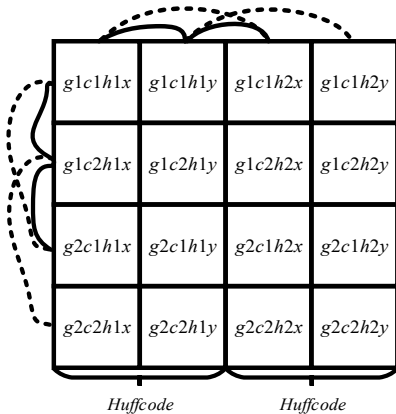


图 6 QMDCT 相关性分析示意图

对 M_{QMDCT} 和 M_{AQMDCT} 进行 2×2 分块, 将其按照图 7 所示方式进行降采样, 分别得到 M_1 、 M_2 、 M_3 、 M_4 四个降采样矩阵, 分别计算其行列方向上的 Markov 转移概率 P_{bhi} 、 P_{bvi} 和 $P_{A_{bhi}}$ 、 $P_{A_{bvi}}$, 其中 $i \in [1, 4]$. 对所得转移概率矩阵求解均值, 得到 P_{bh} 、 P_{bv} 和 $P_{A_{bh}}$ 、 $P_{A_{bv}}$, 即为本文所提 2×2 分块均值 Markov 特征.

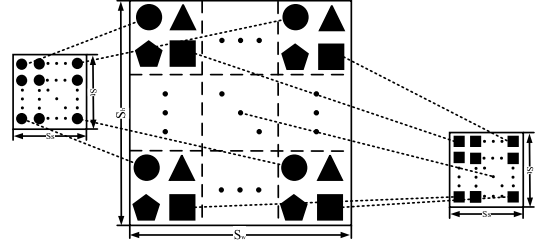


图 7 QMDCT 系数矩阵降采样示意图

$$P_{bh} = \frac{\sum_{i=1}^4 P_{bhi}}{4} \quad (9)$$

$$P_{bv} = \frac{\sum_{i=1}^4 P_{bvi}}{4} \quad (10)$$

$$P_{A_{bh}} = \frac{\sum_{i=1}^4 P_{A_{bhi}}}{4} \quad (11)$$

$$P_{A_{bv}} = \frac{\sum_{i=1}^4 P_{A_{bvi}}}{4} \quad (12)$$

由此得到一组维度为 $8 \times (2T + 1)^2$ 的特征向量 F , 其表达式为:

$$F = [P_{gh}, P_{gv}, P_{A_{gh}}, P_{A_{gv}}, P_{bh}, P_{bv}, P_{A_{bh}}, P_{A_{bv}}] \quad (13)$$

3.5 算法流程

本文所提算法的检测流程如图 8 所示, 具体步骤如下:

1. 提取 MP3 音频的 QMDCT 系数, 预处理后得到矩阵 M_{QMDCT} 和 M_{AQMDCT} ;
2. 计算 M_{QMDCT} 和 M_{AQMDCT} 行列方向的 Markov 转移概率, 得到帧内帧间 Markov 特征;
3. 对 M_{QMDCT} 和 M_{AQMDCT} 按照图 7 所示方式进行降采样, 分别计算 4 个降采样矩阵行列方向的 Markov 转移概率矩阵, 并对所得概率矩阵求和取均值, 由此得到 2×2 分块 Markov 特征;
4. 选定合适的截断阈值 T , 得到特征向量 F , 通过 SVM 分类器进行训练, 其中数据集的 80% 用于训练, 20% 用于测试, 采用 10 交叉验证.

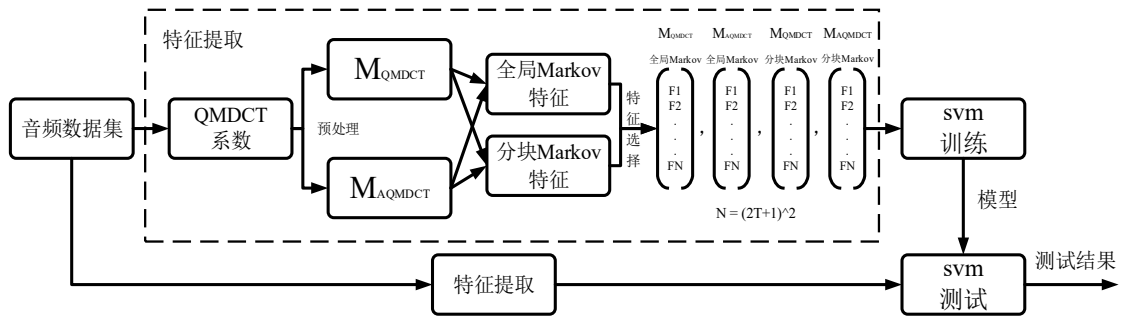


图 8 特征提取流程图

表 1 实验参数设置

参数	值
数据集	数量
	2000
	声道数
	2
	采样频率
	44.1KHz
Lame 编码器	比特率
	1411kbps
	量化比特
	16 位
隐写算法	时长
	10s(384 帧)
	版本
	lame-3.99.5
隐写算法	比特率
	128 / 192 / 256 / 320 kbps
	其他参数
	默认
隐写算法	MP3Stego
	v1.1.18
	HCM
	APS
隐写算法	EECS
	w=2
	相对嵌入率
	0.1 / 0.3 / 0.5
实验环境	CPU: Inter(R) Core(TM) i5-3470 CPU @ 3.20GHz
	RAM: 22.0GB
分类器	SVM 线性核

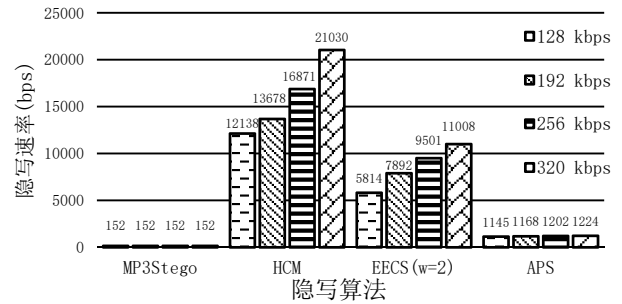


图 9 隐写算法嵌入容量图

表 2 不同比特率及相对嵌入率的隐写消息长度

比特率 kbps	相对嵌入率	隐写消息长度 Bytes			
		MP3Stego	APS	HCM	EECS(w=2)
128	10%	19	143	1520	727
	30%	57	429	4550	2181
	50%	95	715	7585	3635
192	10%	19	146	1710	987
	30%	57	438	5130	2961
	50%	95	730	8550	4935
256	10%	19	150	2110	1188
	30%	57	450	6325	3564
	50%	95	751	10544	5940
320	10%	19	153	2630	1376
	30%	57	459	7890	4128
	50%	95	765	13145	6880

4 实验结果与分析

4.1 实验设置

本文选择当下 MP3 音频隐写算法中最具代表性的 MP3Stego 算法^[1]、Huffman 码字映射算法 (Huffman Code Mapping, HCM)^[2]、MP3 后置式自适应隐写算法 (Adaptive Post-Steganography, APS)^[3]以及基于等长熵码字替换的自适应 MP3 隐写算法 (Equal Entropy Codes Substitution, EECS)^[5]进行检测分析. 同时本文还将对这四种算法在相同比特率和嵌入率条件下组合得到的混合样本进行盲检测分析. 实验各项参数设置如表 1 所示.

本文使用相对嵌入率 (Relative Embedding Rate, RER) 表征嵌入的秘密消息长度占当前隐写载体可嵌入消息总长度的比例.

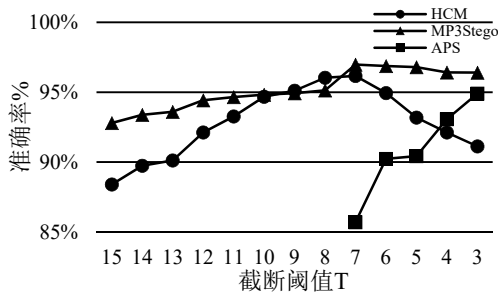
MP3Stego、HCM、APS 以及 EECS 四种算法在不同比特率的隐写速率如图 9 所示. 本文实验所用音频样本时长均为 10s, 由此可以得到在不同比特率与相对嵌入率下的隐写消息长度, 单位为字节 (Bytes, B), 数值如表 2 所示.

4.2 特征分析与选择

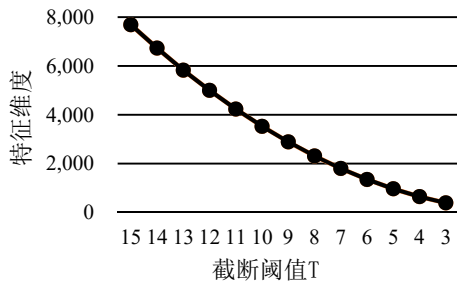
特征选择与分析可以在保持分类准确率不降

的条件下降低特征维度, 提高运算效率, 同时也可使特征更鲁棒, 通用性更强, 是实验中不可或缺的一步. 本节将对截断阈值 T 进行分析, 实验结果如图 10 所示.

从实验结果可以看出, 本文所提特征在对 MP3Stego 和 HCM 算法的检测分析中, 随着截断阈值 T 的减少, 准确率先升高后降低. 而对于 APS 算法, 准确率随着截断阈值 T 的减少而升高. 在 128kbps 比特率下, 对 EECS 算法的检测准确率均低于 80%, 因此下图未对其显示. 综合运算效率、检测准确率与通用性等多方面考虑, 本文最终选定截断阈值 $T = 3$.



(a) 截断阈值选取对准确率的影响



(b) 截断阈值选取对特征维度的影响

图 10 截断阈值选取对性能的影响(bitrate=128kbps, RER=0.1)

4.3 实验结果比较

本文以虚警率(False Positive Rate, FPR)、漏检率(False Negative Rate, FNR)和准确率(Accuracy, ACC)作为最终的评测标准, 计算公式如下:

$$FPR = \frac{FP}{(FP + TN)} \times 100\% \quad (14)$$

$$FNR = \frac{FN}{(TP + FN)} \times 100\% \quad (15)$$

$$ACC = \frac{TP + TN}{(TP + TN + FP + FN)} \times 100\% \quad (16)$$

$$= (1 - \frac{FPR + FNR}{2}) \times 100\%$$

其中, FP 为正常 MP3 音频判定为隐写的个数, FN 为隐写 MP3 音频判定为正常的个数, TP 为隐写 MP3 音频判定为隐写的个数, TN 为正常 MP3 音频

判定为正常的个数.

在隐写分析过程中, 检测准确率与音频的风格无关, 因此本文仅列出比特率与相对嵌入率对检测准确率的影响. 对 MP3Stego、HCM、APS 以及 EECS 四种隐写算法的分析结果如表 4 所示.

本文将通过盲检测分析进一步验证特征的通用性, 在比特率与相对嵌入率相同的条件下将以上四种隐写算法对应的阴阳样本对进行混合, 每种隐写算法对应的样本对各占 1/4, 盲分析结果如表 3 所示.

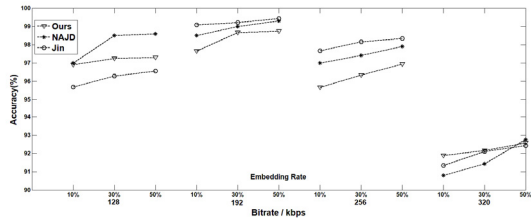
表 3 盲检测分析结果

比特率	相对嵌入率	隐写分析算法	FPR%	FNR%	ACC%
128	0.1	Ours	5.08	14.63	90.25
		Markov-NAJD	5.15	20.29	87.25
		Jin-Markov	9.75	23.12	83.70
	0.3	Ours	4.89	13.56	90.75
		Markov-NAJD	4.79	18.47	88.40
		Jin-Markov	7.21	22.70	84.80
	0.5	Ours	4.58	12.73	91.35
		Markov-NAJD	4.41	17.57	88.90
		Jin-Markov	6.49	22.07	85.45
	0.1	Ours	5.99	9.46	92.25
		Markov-NAJD	4.66	16.16	89.35
		Jin-Markov	6.75	21.51	85.75
192	0.3	Ours	2.27	11.17	93.20
		Markov-NAJD	5.54	14.37	90.15
		Jin-Markov	4.38	23.14	86.20
	0.5	Ours	4.37	7.33	94.15
		Markov-NAJD	3.54	15.81	90.40
		Jin-Markov	5.07	20.56	87.20
	0.1	Ours	4.84	12.67	91.10
		Markov-NAJD	7.06	16.12	88.50
		Jin-Markov	6.00	22.74	85.90
	0.3	Ours	4.34	9.99	92.85
		Markov-NAJD	4.29	16.74	89.30
		Jin-Markov	5.48	21.28	86.35
256	0.5	Ours	3.73	9.92	93.10
		Markov-NAJD	4.02	16.92	89.45
		Jin-Markov	4.70	20.19	87.40
	0.1	Ours	6.84	11.90	90.60
		Markov-NAJD	5.38	20.18	86.85
		Jin-Markov	7.77	25.09	83.45
	0.3	Ours	5.72	10.70	91.70
		Markov-NAJD	5.04	17.04	88.85
		Jin-Markov	7.62	24.05	84.00
	0.5	Ours	4.72	11.04	92.10
		Markov-NAJD	5.23	16.45	89.35
		Jin-Markov	6.41	24.32	84.55

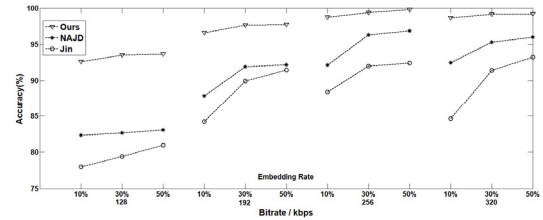
表 4 不同隐写算法的隐写分析结果

比特率	相对嵌入率	分析算法	隐写算法											
			MP3Stego			HCM			APS			EECS		
			FPR%	FNR%	ACC%	FPR%	FNR%	ACC%	FPR%	FNR%	ACC%	FPR%	FNR%	ACC%
128	10%	Ours	3.21	2.99	96.90	8.44	6.33	92.61	4.93	6.55	94.26	28.70	27.77	71.77
		NAJD	3.53	2.45	97.00	17.70	16.13	82.35	6.99	5.60	93.71	35.52	38.12	63.18
		Jin	5.62	3.00	95.69	21.15	22.81	78.02	32.35	27.74	69.96	40.69	38.51	60.40
	30%	Ours	2.46	3.05	97.25	8.06	4.88	93.53	6.19	4.60	94.60	24.36	30.58	72.53
		NAJD	1.97	0.96	98.50	16.35	18.33	82.66	5.22	5.80	94.49	38.42	34.57	63.50
		Jin	4.68	2.73	96.29	21.08	20.12	79.40	27.21	30.13	71.33	39.60	34.37	63.02
	50%	Ours	3.15	2.25	97.30	7.53	5.16	93.66	4.98	5.51	94.75	25.75	28.22	73.02
		NAJD	1.32	1.41	98.60	17.99	15.79	83.10	5.85	4.77	94.70	33.67	36.84	64.75
		Jin	4.07	2.83	96.55	19.81	18.21	80.99	30.33	26.29	71.69	33.51	38.25	64.12
	10%	Ours	3.18	1.55	97.64	2.70	4.17	96.57	5.46	7.21	93.67	22.29	17.40	80.16
		NAJD	1.45	1.54	98.50	12.17	12.04	87.90	7.85	6.60	92.78	38.09	31.78	65.07
		Jin	0.86	0.96	99.09	15.80	15.78	84.21	36.89	38.08	62.51	33.49	33.15	66.68
	30%	Ours	1.49	1.18	98.67	1.97	2.71	97.66	3.95	7.30	94.38	17.44	20.42	81.07

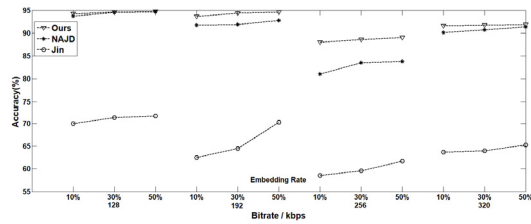
256	50%	NAJD	1.31	0.64	99.00	8.53	8.60	91.44	6.04	7.53	91.74	34.94	31.26	66.90
		Jin	0.00	1.58	99.21	10.57	9.52	89.95	34.92	36.07	64.51	30.56	34.62	67.41
		Ours	1.17	1.37	98.73	1.69	2.86	97.73	4.80	6.01	94.59	20.80	16.32	81.44
	10%	NAJD	1.00	0.39	99.30	8.69	6.91	92.20	6.94	9.29	91.89	31.46	33.93	67.31
		Jin	0.36	0.79	99.42	8.53	7.64	91.91	30.37	29.14	70.24	31.38	33.45	67.59
		Ours	4.64	4.02	95.67	1.46	1.06	98.74	13.32	10.64	88.02	13.49	10.95	87.78
	30%	NAJD	2.83	3.18	97.00	9.82	5.87	92.16	19.22	18.68	81.05	31.42	34.31	67.13
		Jin	2.55	2.12	97.67	13.50	9.61	88.44	44.24	38.69	58.54	26.94	26.55	73.25
		Ours	3.47	3.86	96.34	0.83	0.40	99.39	11.59	11.28	88.56	13.97	8.79	88.62
	50%	NAJD	1.99	3.06	97.40	5.22	2.17	96.31	17.15	15.17	83.54	31.16	32.52	68.16
		Jin	1.84	1.85	98.16	8.13	7.80	92.03	40.82	40.07	59.55	28.79	22.47	74.37
		Ours	2.45	3.67	96.94	0.41	0.00	99.79	10.81	11.08	89.05	13.35	9.17	89.74
320	50%	NAJD	1.24	2.85	97.90	2.99	3.24	96.88	17.08	15.24	83.84	30.03	33.11	68.43
		Jin	1.16	2.18	98.33	8.78	6.42	92.40	36.36	40.29	61.67	26.64	20.66	76.35
		Ours	8.90	7.34	91.88	2.13	0.58	98.65	9.34	7.50	91.58	17.16	18.33	82.25
	10%	NAJD	6.10	12.32	90.79	7.41	7.64	92.48	12.16	7.58	90.13	31.28	36.92	65.90
		Jin	8.28	9.05	91.33	17.65	13.04	84.66	38.14	34.51	63.67	28.06	26.58	72.68
		Ours	8.43	7.26	92.15	1.38	0.39	99.12	8.72	7.79	91.74	18.12	15.32	83.28
	30%	NAJD	7.28	9.87	91.42	4.35	5.03	95.31	10.64	7.88	90.74	34.41	31.03	67.28
		Jin	8.18	7.61	92.10	10.18	7.01	91.40	37.27	34.77	63.98	27.31	25.49	73.60
		Ours	8.07	6.77	92.58	1.19	0.37	99.22	7.25	8.98	91.88	17.25	15.82	83.47
	50%	NAJD	7.27	7.23	92.75	7.65	2.57	96.00	10.04	7.15	91.40	32.37	31.36	68.14
		Jin	7.49	7.68	92.42	7.74	5.73	93.26	35.20	34.28	65.26	24.37	25.63	75.00



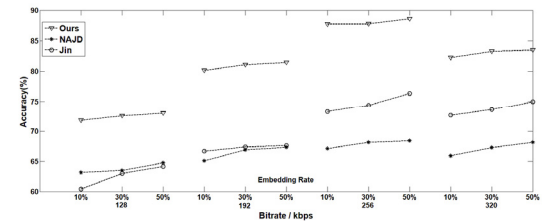
(a) MP3Stego 算法隐写分析准确率



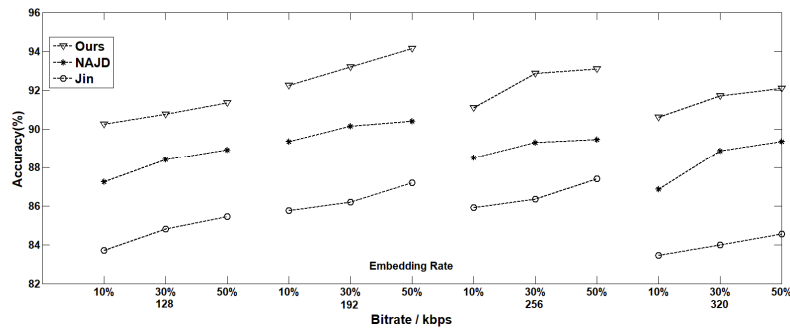
(b) HCM 算法隐写分析准确率



(c) APS 算法隐写分析准确率



(d) EECS(w=2)算法隐写分析准确率



(e) 盲检测分析准确率

图 11 各算法在不同比特率与不同相对嵌入率条件下的隐写分析准确率

由实验结果可以看出, 本文提出的块内块间 Markov 特征与 Jin-Markov、Markov-NAJD 特征对 MP3Stego 算法的检测结果相当, Jin-Markov、Markov-NAJD 特征在低码率下的性能略优. 针对 HCM 算法的隐写分析, 本文所提特征相较于其他特征至少提升 5%. 针对 APS 算法的隐写分析, 本文所提特征略优于 Markov-NAJD 特征, 检测结果均在 88% 以上, 而 Jin-Markov 特征的检测准确率仅在 70% 上下. EECS 算法是当前较为安全的大容量隐写算法之一, 本文所提特征对这一算法的结果相比于其他两种分析算法提升至少 10%, 在 128kbps 比特率下结果较差, 仅为 72% 左右, 对其余码率的检测准确率均在 80% 以上.

在固定比特率与相对嵌入率的盲检测分析中, 本文所提特征在所有条件下的检测准确率均高于 90%, 相比于同类型的 Jin-Markov 特征和 NAJD 特征至少提升 2%, 验证了本文所提特征的通用性.

5 结论与展望

通过分析多种隐写算法对 MP3 时域和频域的影响, 本文提出一种基于 QMDCT 系数块内块间相关性的隐写分析特征, 以 M_{QMDCT} 和 M_{AQMDCT} 矩阵帧内帧间 Markov 转移概率和 2×2 分块均值 Markov 转移概率为特征, 可以有效实现对 MP3 音频的隐写分析. 实验结果表明, 本文所提特征可同时实现 MP3Stego、Huffman 码字映射等多种 MP3 隐写算法的检测分析, 对安全性较高的 EECS 算法的检测准确率也可达到 80% 以上, 相比于现有通用分析特征提升至少 10%. 而且本文所提特征的盲检测分析准确率均在 90% 以上, 具有较好的泛化能力.

本文后续工作有以下两个方面:

1. 引入滑动窗口检测策略, 实现对隐写消息长度的分析和获取, 同时以应对非起始帧嵌入的隐写算法;
2. 将本文提出的算法进一步扩展, 实现基于 GPU 的并行计算, 以提高算法效率.

参考文献:

- [1] Petitcolas F. MP3Stego[EB/OL]. (2002) [2013-04-01]. <http://www.petitcolas.net/steganography/mp3stego/>.
- [2] 严迪群, 王让定, 张力光. 基于 Huffman 编码的大容量 MP3 隐写算法[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2011, 48(6):1281-1286.
- [3] 张垚, 潘峰, 申军伟, 李宁波. 基于 MP3 的后置式自适应隐写算法[J]. 计算机科学, 2016, 43(8):114-117.
- [4] 张垚, 潘峰, 申军伟. 基于 MP3 的内嵌型自适应隐写算法[J]. 计算机工程与设计, 2016, 37(6):1537-1542.
- [5] Yang K, Yi X, Zhao X, et al. Adaptive MP3 Steganography Using Equal Length Entropy Codes Substitution [C]// International Workshop on Digital Watermarking. Springer, Cham, 2017: 202-216.
- [6] Westfeld, A. and Pfitzmann A. Attacks on Steganographic Systems, Proc. 3rd Info. Hiding Workshop, Dresden, Germany, September 28–October 1, 1999, pp. 61–75.
- [7] Qiao M, Sung A H, Liu Q. Steganalysis of MP3Stego[C]// International Joint Conference on Neural Networks. IEEE Press, 2009:2723-2728.
- [8] 万威, 赵险峰, 黄炜, 盛任农. 基于码表分布特征和重编码的 MP3Stego 隐写分析[J]. 中国科学院研究生院学报, 2012, 29(1):118-124.
- [9] Yan D, Wang R. Detection of MP3Stego exploiting recompression calibration-based feature[J]. Multimedia Tools & Applications, 2014, 72(1):865-878.
- [10] Jin C, Wang R, Yan D. Steganalysis of MP3Stego with low embedding-rate using Markov feature[J]. Multimedia Tools & Applications, 2016, 76(5):1-16.
- [11] 汪云路, 程义民, 谢春辉, 谢于明. 基于组合质量评估参数的音频信息隐藏盲检测方法仿真[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(12):3768-3772.
- [12] Ghasemzadeh H, Khass M T, Arjmandi M K. Audio steganalysis based on reversed psychoacoustic model of human hearing[J]. Digital Signal Processing, 2016, 51:133-141.
- [13] Ren Y, Xiong Q, Wang L. A Steganalysis Scheme for AAC Audio Based on MDCT Difference Between Intra and Inter Frame[C]// International Workshop on Digital Watermarking. Springer, Cham, 2017:217-231.
- [14] Paulin C, Selouani S A, Éric Hervet. Audio steganalysis using deep belief networks[J]. International Journal of Speech Technology, 2016, 19(3):1-7.
- [15] Chen B, Luo W, Li H. Audio Steganalysis with Convolutional Neural Network[C]// The ACM Workshop. ACM, 2017:85-90.
- [16] ISO / IEC 11172-3. Coding of moving pictures and associated audio for digital storage media at up to about 1.5Mbit/s, Part 3 : Audio [P]. 199.

MP3 Audio Steganalysis Utilizing both Intrablock and Interblock Correlations

Wang Yuntao^{1,2} *Yang Kun*^{1,2} *Yi Xiaowei*^{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: A new steganalysis method is proposed based on the poor versatility of many steganalysis method now. In this paper, we present an effective feature which utilizes both the intrablock and interblock correlations among QMDCT coefficients. A 2×2 “averaged” block Markov feature is proposed based on the pairwise coding characteristics of QMDCT coefficients to enhance the intra frame and inter frame transition probability. The features are trained for steganalysis via SVM. Experimental results show that the proposed steganalysis method has good detection accuracy and detection performance for various MP3 steganography including MP3Stego, Huffman code mapping, etc. The detection accuracy is improved by at least 2% compared with the recent steganalysis algorithms and the accuracy of blind detection is over 90%.

Keywords: MP3 steganalysis; blind detection; Markov; SVM