

文章编号:1001-9081(2010)03-0705-03

## 基于 LSB 和量化思想的倒谱域音频水印算法

李文治<sup>1,2</sup>, 张晓明<sup>1</sup>, 殷雄<sup>3</sup>

(1. 北京石油化工学院 信息工程学院, 北京 102617; 2. 北京化工大学 信息科学与技术学院, 北京 100029;

3. 中软资源公司, 北京 100089)

(liwenzhi84@bipt.edu.cn; liwenzhi84@hotmail.com)

**摘要:** 为了达到版权保护目的, 采用基于最不重要位 (LSB) 和量化思想, 提出了一种新颖的小波域内倒谱水印算法。首先将音频数据进行分段处理和小波变换, 并计算每段音频小波系数的倒谱域均值, 然后计算每段均值的 LSB 位, 最后通过 LSB 位的奇偶量化来完成秘密水印的嵌入。提取时, 只需要判断倒谱域均值的 LSB 奇偶来恢复秘密水印。算法完全属于盲提取。算法嵌入过程中不依赖于任何阈值, 更有利于算法的实际应用。实验结果表明, 算法对于重采样、重量化、低通滤波和幅度攻击等都有很好的鲁棒性。

**关键词:** 音频水印; 最不重要位; 量化; 倒谱

**中图分类号:** TP309 **文献标志码:** A

## Watermarking algorithm of complex cepstrum domain audio based on LSB and quantizing

LI Wen-zhi<sup>1,2</sup>, ZHANG Xiao-ming<sup>1</sup>, YIN Xiong<sup>3</sup>

(1. College of Information Engineering, Beijing Institute of Petro-chemical Technology, Beijing 102617, China;

2. College of Information Science and Technology, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China;

3. ChinaSoft Resource Company, Beijing 100089, China)

**Abstract:** In order to protect copyright, a novel cepstrum transform watermarking algorithm in wavelet domain was proposed. The proposed algorithm adopted the idea of Least Significant Bit (LSB) and quantization. Firstly, the audio signal was divided into several segments; the segment was transformed with wavelet domain and complex cepstrum. Then the LSB of mean of complex cepstrum coefficients was computed. Lastly, the watermark was embedded into the mean of complex cepstrum coefficients through changing its odd and even. When extracting, only the LSB of mean of complex cepstrum coefficients was judged to restore the watermark. The algorithm was blind. The embedding processing of the proposed algorithm does not depend on any threshold, and it is more conducive to the practical application of the algorithm. The experimental results show that the algorithm is very robust to re-sampling, re-quantization, low filter, amplitude attack, etc.

**Key words:** audio watermarking; Least Significant Bit (LSB); quantization; cepstrum

## 0 引言

文献[1]根据倒谱系数的分布和 HAS 的频率掩模特性, 将水印扩展到音频信号的几个倒谱分量中。该算法抗攻击性能较好, 但计算较复杂。文献[2]采用了统计均值处理 (Statistical-Mean Manipulation, SMM) 法。仿真实验证明对抖动回波相加, 时间刻度弯折具有很强的鲁棒性。该算法对同步攻击具有很强的鲁棒性, 但水印嵌入强度的控制因子  $\alpha(n)$  不易确定。文献[3]也利用统计均值处理法, 同时将时域中的突变点作为水印帧的起始点, 并将时域音频信号变换到倒谱域, 嵌入水印。其仿真结果表明对同步攻击和剪切等具有较强的鲁棒性, 但调制幅度偏置因子  $\alpha$  的取值不易确定。文献[4-5]将复倒谱系数均值与阈值进行比较, 结合水印序列为“0”或“1”, 采取缩小增加或不改变复倒谱系数均值的方法, 在复倒谱系数中嵌入水印。实验证明, 该算法具有较强的健壮性, 提取水印属盲水印提取, 能有效地抵抗添加噪声、重采样、低通滤波和音频格式转换等常见信号处理及攻击。文献[4]虽能抵抗常见信号攻击, 但抗攻击能力有待提高。文

献[6]提出了一种基于量化思想的倒谱域算法, 但其量化间隔参数属于固定值, 不便于实际应用, 且抗攻击能力有待进一步加强。文献[7]提出了一种复倒谱域自适应音频数字水印技术, 其嵌入的强度由实际应用中检测过程的具体要求控制, 提取过程中采用了独立分量分析 (Independent Component Analysis, ICA) 技术, 有很强的去同步攻击能力。文献[8]提出了一种利用倒谱域两端系数比较大, 其余的幅值都在 0 附近波动的特点, 采用统计均值调制, 在倒谱域嵌入水印的方法。文献[9]提出了一种基于小波域及复倒谱域的利用人类听觉系统的音频水印算法, 实验结果表明算法对于基本的信号处理攻击有很强的鲁棒性。

由于大多数信号处理操作对于倒谱系数的统计均值干扰很小, 故本文将 LSB 思想与奇偶量化思想应用于倒谱系数的均值中, 提出一种新的倒谱域音频水印算法, 算法不依赖于任何阈值。算法中采用纠错编码技术来提高算法的鲁棒性。

## 1 音频水印算法

### 1.1 水印预处理

设  $W$  为水印图像, 为了增加水印数据的保密性, 首先应

收稿日期: 2009-09-17; 修回日期: 2009-11-03。

**作者简介:** 李文治 (1984-), 女, 山东兖州人, 硕士研究生, 主要研究方向: 信息隐藏、音频水印; 张晓明 (1968-), 男, 江西宁都人, 教授, 博士, 主要研究方向: 网络系统、信息安全; 殷雄 (1984-), 男, 湖北洪湖人, 工程师, 硕士, 主要研究方向: 数字水印。

该对水印图像进行置乱处理,这里的置乱操作采用的是 Logistic 混沌映射<sup>[8]</sup>。然后对置乱后的二维图像水印进行降维操作,形成 0、1 二值序列  $w(j), j = 0, 1, \dots, M-1$ 。

为了提高算法的抗攻击能力,对降维的二值序列  $w(j)$  进行纠错编码,形成真正待嵌入的水印序列  $S(j)$ 。

### 1.2 水印嵌入算法

嵌入算法的基本思路是首先将音频数据进行分段,并对每段音频信号进行小波分解,然后计算每段小波系数的倒谱域均值,然后计算每段均值的最不重要位,通过判断最不重要位的奇偶性以及均值进行量化处理来完成水印的嵌入。其详细描述过程如下。

1) 设原始音频信号为:  $A = \{a(n), 0 \leq n \leq N-1\}$ , 其中  $a(n) \in \{0, 1, 2, \dots, 2^p-1\}$ ,  $p$  为音频的采样精度,把原始音频信号分为若干帧,并对每帧进行四级小波变换。将秘密信息嵌入到第四级小波低频系数中。

2) 对每帧的第四级低频系数进行一维的复倒谱变换。Matlab 工具箱中提供的复倒谱变换对于信号序列的均值大于或等于 0 时,其逆变换可逆;否则,其逆变换不可逆。为了使逆变换可逆,需要计算指定段信号的均值,若均值小于 0 则取反,然后对所有指定段进行复倒谱变换。

$$(C(i), nd(i)) = CCEPS(Aca4(i))$$

3) 由于倒谱系数两端的值较大,而且会影响到倒谱系数的均值,造成不平稳的情况,本文中去掉倒谱系数首尾各  $t$  个系数,对剩下的  $L1 - 2 \times t$  个系数计算每帧倒谱系数  $C(i)$  的均值  $Q(i)$ :

$$Q(i) = \text{Mean}(C(i)) = \frac{1}{L1 - 2 \times t} \sum_{i=t+1}^{L1-t} C(i)$$

其中  $L1$  为每帧倒谱系数的长度。

4) 分析每帧均值  $Q(i)$  的最不重要位。由于本文采用的是倒谱变换的细节变化信息来计算的统计平均值,故它的值比较小。文中采用均值的从左往右第一个不为零的位为最重要位,而它的下一位则为最不重要位,记为  $P(i)$ 。

5) 对均值  $Q(i)$  进行量化。设  $R(i) = Q(i) \% (10^{-(P(i))})$ ,  $Z(i) = Q(i) - R(i) \times 10^{-(P(i))}$ , 则:

$$\text{If } P(i) \% 2 = w(j) \text{ then } Q'(i) = Q(i)$$

$$\text{If } P(i) \% 2 \neq w(j) \text{ and } Z(i) < 10^{-(P(i))/2} \text{ then}$$

$$Q'(i) = (R(i) - 1) \times 10^{-(P(i))} + 10^{-(P(i))/2}$$

$$\text{If } P(i) \% 2 \neq w(j) \text{ and } Z(i) > 10^{-(P(i))/2} \text{ then}$$

$$Q'(i) = (R(i) + 1) \times 10^{-(P(i))} + 10^{-(P(i))/2}$$

6) 假设均值量化所产生的误差大小为  $\Delta(i)$ , 则  $\Delta(i) = Q'(i) - Q(i)$ 。为了使得每帧均值变化  $\Delta(i)$ , 则该帧中的每一个倒谱系数  $C'(i)$  都需要按照式(1)进行修改:

$$C'(i) = C(i) + \Delta(i) \quad (1)$$

7) 将每帧修改后的倒谱系数进行逆复倒谱变换,形成第四级小波低频系数。然后将修改的第四级小波低频系数与原始音频的小波系数进行小波逆变换,形成真正含有水印的混合音频信号。

### 1.3 数字水印的提取算法

由于水印的嵌入算法中仅仅用倒谱系数的平均值的奇偶性来进行水印(0,1)的嵌入,在提取水印的时候只需要判断倒谱系数平均值的奇偶,不需要原始音频信号的参与,所以水印提取算法是一种盲提取。详细的水印提取过程如下:

1) 对混合音频文件进行分帧处理、小波变换,其中帧的长度、小波变换的级数以及小波基与嵌入算法中相同;

2) 然后对每帧小波变换的第四级小波低频系数实施一维复倒谱变换,得到复倒谱系数;

3) 计算出每帧中  $(L1 - 2 \times t)$  个复倒谱系数的均值  $QE(i)$ ;

4) 分别计算出每帧复倒谱系数均值的最不重要位  $PE(i)$ ,并通过判断  $PE(i)$  的奇偶性来提取出水印序列  $S'(j)$ ;

5) 按照水印预处理过程,将得到的水印序列  $S'(j)$  分别进行纠错解码、升维处理以及去置乱操作,提取出真正的图像水印信息。

## 2 水印评价指标

为了消除人为主观因素对水印评价的影响,采用归一化相关系数 NC 对原始水印与提取的水印相似度进行评价。归一化相关系数的计算公式如下:

$$NC(W, W') = \frac{\sum_{i=1}^{m1} \sum_{j=1}^{m2} W(i, j) \times W'(i, j)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m1} \sum_{j=1}^{m2} W(i, j)^2}}$$

其中  $W$  与  $W'$  分别为原始水印和提取的水印;  $NC(W, W')$  越接近 1,则表示  $W$  与  $W'$  的相似度就越高,提取的水印越接近原始水印;  $NC(W, W')$  越接近 0,则它们的相似度就越低,提取的水印与原始水印越不相同。

## 3 实验结果及分析

实验采用采样频率为 44.1 kHz、量化精度为 16 b、样本的长度约为 160 s 的单声道音频文件,水印为  $16 \times 16$  的二值图像。水印嵌入过程中,按每帧 1024 个采样点进行分帧,并进行 4 级小波变换,间隔 5 帧嵌入一个水印信息。每帧倒谱系数前后去掉的系数个数为 10。在无攻击的情况下,声音的试听结果显示混合音频和原始音频的差别几乎无法感知,达到了隐藏信息“透明”的要求。混合音频的信噪比(Signal Noise Ratio, SNR)为 48.838,提取的图像水印误码率 BER 为 0。从图 1 的对比中可以看出,原始音频与嵌入水印后的混合音频波形几乎一致,说明该算法的透明性很好。

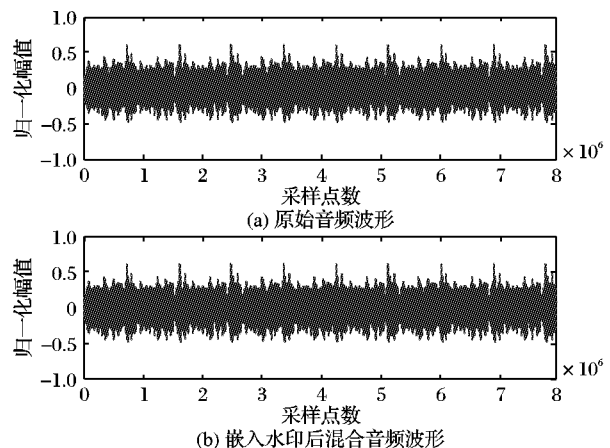


图1 原始音频与混合音频对比

为了检测水印算法的性能,对含有水印的数字音频信号

采用了以下几种方式进行攻击,如图2所示。

1)重新采样。重新采样分为下采样和上采样两种。其中下采样是指将音频信号由原来的44.1 kHz采样频率变为22.05 kHz,然后再将采样频率变回原来的44.1 kHz;上采样是指将音频信号由原来采样频率变为48 kHz,然后再变回原来的采样频率。

2)重量化。重量化分为下量化和上量化两种。其中下量化是指将音频的采样精度由原来的16变成8,然后再变换回原来的采样精度;上量化是指将音频的采样精度由原来的16变成32,然后再变换回原来采样精度16。

3)低通滤波。采用阶数为2,截止频率为11 025 Hz的巴特沃斯低通滤波器进行滤波。

4)幅度攻击。将音频幅度分别增大或减少40%。

5)噪声攻击。添加高斯白噪声,使得添加后的混合音频信噪比降低至20 dB。

6)MP3压缩攻击。利用CoolEdit音频软件对混合音频经

过Wav—MP3—Wav的音频格式转换。

为了对比本文算法与文献[4]、[6]、[8]、[9]中的算法,特对比提取水印的归一化系数,如表1所示。

水印	攻击方式
北	原始水印
北	未经过任何攻击所提取的水印
北	经过下采样处理的混合音频提取出的水印
北	经过上采样处理的混合音频提取出的水印
北	经过下量化处理的混合音频提取出的水印
北	经过上量化处理的混合音频提取出的水印
北	经过低通滤波的混合音频提取出的水印
北	经过幅度增加40%的混合音频提取出的水印
北	经过幅度减少40%的混合音频提取出的水印
北	经过加噪处理后混合音频提取出的水印
北	混合音频经过cooledit软件进行96kps的MP3攻击后提取的水印
北	混合音频经过cooledit软件进行56kps的MP3攻击后提取的水印
北	混合音频经过cooledit软件进行32kps的MP3攻击后提取的水印

图2 原始水印与各种不同攻击下提取的水印对比

表1 各种算法在各种攻击后提取图片归一化系数对比

算法	直接提取 $\rho$	重采样		重量化		低通滤波	幅度攻击		噪声攻击	MP3攻击		
		上	下	上	下		+40%	-40%		96 kps	56 kps	32 kps
本文算法	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.9276	0.9467	1.0000	1.0000	0.9548	1.0000	1.0000	1.0000
文献[4]算法	1.0000	0.9069	0.8437	1.0000	0.9742	0.6524	未涉及	未涉及	未涉及	未涉及	未涉及	0.8452
文献[6]算法	0.9840	0.9840	0.9833	未涉及	0.9653	0.9792	未涉及	未涉及	0.9602	未涉及	0.8912	未涉及
文献[8]算法	1.0000	0.7843	0.7245	未涉及	0.6892	0.7465	未涉及	未涉及	0.8267	0.8624	0.7543 (64 kps)	不能提取
文献[9]算法	0.8823	0.8820	0.8819	未涉及	0.6512	0.8611	未涉及	未涉及	0.7902	未涉及	未涉及	未涉及

## 4 结语

本文充分利用复倒谱变换的性质,将LSB思想与量化思想相结合,提出了一种新的音频水印算法,算法不需要任何经验值,便于实际应用。该算法具有良好的鲁棒性,非常好的透明性,提取属于盲提取,能经受噪声、重新采样、重新量化、低通滤波和幅度攻击等多种攻击。与普通的SMM算法相比,本算法解决了阈值选取等问题,具有更好的鲁棒性。

### 参考文献:

- [1] KWANG L S, SUNG H Y. Digital audio watermarking in the cepstrum domain [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2000, 46(3): 744-750.
- [2] XIN L, HEATHER Y H. Transparent and robust audio data hiding in cepstrum domain [C]// Proceedings of 2000 IEEE International Conference on Multimedia and Expo. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2000: 397-400.

- [3] HSIEH C T, SOU P Y. Blind cepstrum domain audio watermarking based on time energy features [C]// Proceedings of the 14th International Conference on Digital Signal Processing. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2002: 705-708.
- [4] 李跃强,孙星明,周天亮.基于复倒谱变换的数字音频水印研究[J].计算机工程,2006,32(23):145-147.
- [5] 李跃强,孙星明,侯发忠.基于复倒谱系数均值比较的数字音频水印算法[J].微计算机信息,2006,22(24):250-253.
- [6] 刘娇,费耀平,李敏.基于量化的倒谱变化数字音频水印算法[J].计算机工程与应用,2007,43(33):84-86.
- [7] 张力,钱泰斌,纪震,等.复倒谱域自适应音频盲水印技术[J].计算机工程,2007,33(4):128-131.
- [8] 吕秀丽,年桂君.基于倒谱域的鲁棒音频数字水印算法[J].大庆石油学院学报,2005,29(4):130-132.
- [9] TANG XIANG-HONG, NIU YA-MEI, YUE HENG-LI, et al. A digital audio watermark embedding algorithm [J]. International Journal of Information Technology, 2005, 11(12): 24-31.

(上接第704页)

- [3] KUTTER M, BHATTACHARJEE S K, EBRAHIMI T. Towards second generation watermarking scheme [C]// Proceedings of the 6th International Conference on Image Processing. Kobe, Japan: [s. n.], 1999: 26-58.
- [4] BAS P, CHASSERY J M, MACQ B. Geometrically invariant watermarking using feature points [J]. IEEE Transactions on Image Process, 2002, 11(9): 1014-1028.
- [5] 王向阳,侯丽敏,乌俊.基于图像特征点的强鲁棒数字水印嵌入方案[J].自动化学报,2008,34(1):1-6.
- [6] LEE H Y, LEE C H, LEE H K. Feature-based image watermarking

- method using scale-invariant keypoints [C]// PCM2005: Advances in Multimedia Information Processing, LNCS 3768. Berlin: Springer, 2005: 312-324.
- [7] LEE H Y, KIM H, LEE H K. Robust image watermarking using local invariant features [J]. Optical Engineering, 2006, 43(3): 1-10.
- [8] LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints [J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2): 91-110.
- [9] 吕冀,汪瀚,高洪民,等.图像局部特征识别中的多目标分离[J].光子学报,2008,37(8):1708-1712.