

# 基于 DCT 系数符号的音频零水印算法

孙瑞鹏<sup>1</sup>, 徐海涛<sup>2</sup>

(1. 上海大学 机电工程与自动化学院, 上海 200072;  
2. 我友网络科技有限公司, 上海 201800)

**摘要:**为了解决现有音频水印算法透明性与鲁棒性之间的矛盾,提出了一种基于 DCT 系数符号的音频零水印算法。算法按水印尺寸对时域音频数据做等长分帧,求取每帧数据的绝对值平均值,依次按时序做离散余弦变换(DCT)。算法选取数值最大的 DCT 系数,利用水印属性与最大 DCT 系数符号做异或运算,得到水印密钥,实现了零水印的嵌入。实验结果表明该算法可以很好地抵抗各类常规的信号处理破坏,水印鲁棒性较强。

**关键词:**音频水印;零水印;离散余弦变换;鲁棒性;系数符号

中图分类号:TP309

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2014)05-0146-04

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2014.05.035

## An Audio Zero-watermarking Algorithm Based on DCT Coefficients Symbol

SUN Rui-peng<sup>1</sup>, XU Hai-tao<sup>2</sup>

(1. School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China;  
2. Shanghai Woyou Network Technology Co., Ltd., Shanghai 201800, China)

**Abstract:** In order to solve the contradiction between the transparency and the robustness in the existing audio watermark algorithm, a zero-watermark algorithm based on DCT coefficients processing is proposed. The audio is split into equal frames based on size of watermark, and then calculate the average of the absolute value of each frame and using the average do DCT. The algorithm selects the maximum value of the DCT coefficient, applying the watermark characteristic and maximum value of DCT coefficient for XOR operation to get watermark key, accomplishing the zero-watermarking embedded. The experimental results show that the algorithm is a strong watermark robustness which can be very good resistance to various types of conventional signal processing.

**Key words:** audio watermark; zero-watermark; discrete cosine transform; robustness; coefficients symbol

## 0 引言

随着计算机技术的发展和 Internet 的普及,人们可以很方便地下载、传播、处理和发布多媒体文件,例如一首音乐可以很方便地由一个网站复制到另一个网站,这种复制方便实现而且成本很低,对音乐质量没有任何损伤,这给音乐创作者及唱片方造成了巨大损失<sup>[1-2]</sup>。对于传统的加密算法,一旦多媒体文件解密给有盗版意图的机构,便可以随意的拷贝,将不再受到保护<sup>[3]</sup>。数字水印技术作为一种可以时刻跟踪数字多媒体作品的版权保护技术,已经成为当今信息安全领域的研究热点。而如何设计一种既简单实现又不对原始音频文件的质量造成破坏的音频水印算法,成为当

今网络音频版权保护的一个难点。

按嵌入域的不同,传统数字水印算法可分为时域算法和变换域算法。时域算法虽然实现简单,计算速度快,实时性较好,但是嵌入量少,鲁棒性差。传统的数字水印算法研究多倾向于变换域,如离散余弦变换(DCT)域、离散小波变换(DWT)域等。传统水印算法所面临的共同难点是水印透明性与鲁棒性之间的平衡。一方面,水印嵌入需满足透明性,不可对原始载体产生可见性改变;另一方面,嵌入的水印信息可以经受破坏,保证水印信息具有较高的提取率来证明作品的版权<sup>[4]</sup>。

为了解决水印嵌入时透明性与鲁棒性之间的根本

收稿日期:2013-07-02

修回日期:2013-10-16

网络出版时间:2014-02-11

基金项目:文化部全国文化市场技术监管系统建设项目(ZTXY-2012-F00110)

作者简介:孙瑞鹏(1988-),男,河北邢台人,硕士研究生,研究方向为数字图像压缩、数字水印技术。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20140211.1448.004.html>

矛盾,真正实现水印的鲁棒嵌入又不对载体文件造成破坏,温泉等于 2001 年首次提出了“零水印”的概念<sup>[5]</sup>。零水印算法是指不改变原始音频载体的任何信息,而通过原始载体数据的重要特征来构造一个水印,如果这个水印具有较好鲁棒性,那么零水印可以很好地解决透明性与鲁棒性之间的矛盾<sup>[6]</sup>。数字音频零水印算法按嵌入域,可分为时域算法和变换域算法。时域算法主要是基于矢量量化的方法<sup>[7]</sup>,对音频信号的稳定特征进行线性预测,并做矢量量化处理,将量化结果转化为水印信息。但是利用矢量量化技术,必然要构造一个量化的码本,不同的音频文件采样同一个码本量化必然会降低量化的质量<sup>[8-9]</sup>。常规音频文件含有巨大的采样点数,假如对每个音频文件单独构造一个码本,则势必增加算法的计算量。变换域的算法主要有快速傅里叶变换(FFT)<sup>[10]</sup>、离散余弦变换(DCT)<sup>[11]</sup>、离散小波变换(DWT)<sup>[12]</sup>。变换域算法主要是利用变换后的系数以一定规则确定一个阈值,再根据变换系数与此阈值的比较获得与水印信息做异或的 0、1 序列,这类方法虽然简单,但是均未对接近阈值的变换系数进行讨论,而这类系数往往数量较多且受干扰易在阈值上下浮动,降低了水印的鲁棒性。

文中提出了一种基于 DCT 系数符号的零水印算法,算法根据音频文件转码(WAVE—MP3—WAVE)前后,DCT 系数符号具较好的鲁棒性这一特征来构建水印,利用 DCT 最大系数的符号作为水印信息嵌入的参考特征,通过水印信息与最大系数符号所表征属性(1 或 0)进行异或运算,实现零水印的嵌入。实验表明,文中所提方法对各类攻击具有较强的鲁棒性。

## 1 DCT 系数符号鲁棒性分析

离散余弦变换(Discrete Cosine Transform, DCT)简称 DCT 变换,是最小均方误差条件下得出的较优的正交变换,一维离散余弦变换(DCT)及其逆变换(IDCT)如下:

$$F(u) = \sqrt{\frac{2}{M}} K(u) \sum_{x=0}^{M-1} f(x) \cos\left(\frac{\pi(2x+1)u}{2M}\right) \quad (1)$$

$$f(x) = \sqrt{\frac{2}{M}} \sum_{u=0}^{M-1} K(u) F(u) \cos\left(\frac{\pi(2x+1)u}{2M}\right) \quad (2)$$

其中

$$K(u) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}} & u = 0 \\ 1 & u = 1, 2, \dots, M-1 \end{cases} \quad (3)$$

音频数据在压缩转码时的一个重要步骤是对频域中系数的量化处理。频谱系数经量化处理后,系数数值发生改变,但系数的符号不易改变。

图 1 是对某一音频文件经 MP3 转码(WAVE—

MP3—WAVE)前后的音频数据(wav;码率 1 411 kbs,采样率 44.1 kHz;MP3;码率 128 kbs,采样率 44.1 kHz),在音频的 40 s~50 s 内,每 5 个采样点的绝对值取平均,共计 80 000 个平均值,每 8 个点做 DCT 后的频谱系数变号的概率统计。由图可见,除第一个直流分量系数符号不变之外,其余每个系数符号都发生改变,但是变化概率不是很大,最大的也只有 5.5%,DCT 系数鲁棒性很好。

图 2 是每 10 个采样点的绝对值取平均代替图 1 中的 5 点情形,经 DCT 后频谱系数变号的概率统计,每个频谱系数变号的概率较之图 1 均有降低,DCT 系数符号鲁棒性更好。多点取平均操作可以减少转码对 DCT 系数符号的影响,随着平均点数的增加可以提高 DCT 系数符号的鲁棒性。

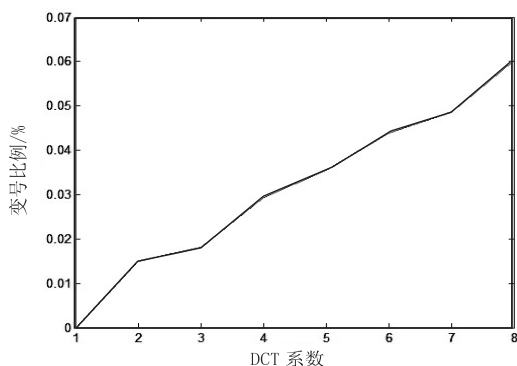


图 1 五点均值变号概率分布

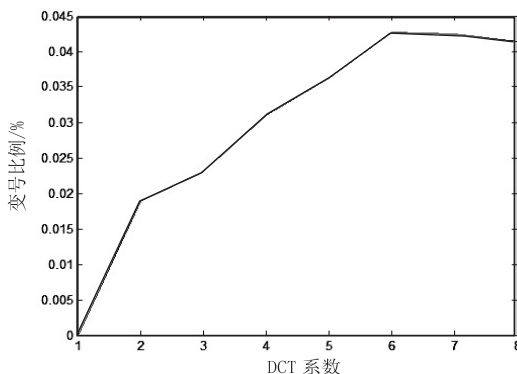


图 2 十点均值变号概率分布

## 2 基于 DCT 系数符号的音频零水印算法

传统变换域水印算法,往往选择变换后的中频系数作为水印嵌入,因为低频系数的稳健性最好,这里说的稳健性是系数数值不易改变,但是由于低频系数包含大部分的能量,即使轻微的改动,也很可能造成原始载体文件的破坏,因此常选择中频数据嵌入水印作为折中。对于零水印方法,由于无需对原始载体文件做任何的改变,水印生成过程中不会导致音频数据的受损。

文中零水印算法根据 DCT 系数的符号具有较强

鲁棒性为基础,选择数值较大的 DCT 系数,利用该系数符号(1 或 0)与水印信息进行异或运算,生成零水印密钥,从而实现零水印在音频数据上的嵌入。

## 2.1 基于不保存系数位置的 DCT 系数符号的音频零水印算法

### 1) 水印嵌入。

(1) 设原始音频信号为  $F$ , 待嵌入水印图像  $X$  的像素点总数为  $w$ , 按水印图像的像素点数将载体分为  $w \times n$  等长的互不重叠的帧;

(2) 计算每帧幅值绝对值的算术平均值, 按  $n$  个均值为 1 依次做 DCT 变换, 得到  $w$  组 DCT 系数

$$\{f_{11}, f_{12}, \dots, f_{1n}\}, \dots, \{f_{i1}, f_{i2}, \dots, f_{in}\}, \dots, \{f_{w1}, f_{w2}, \dots, f_{wn}\}$$

(3) 取  $|f_{ij}| = \max\{|f_{i2}|, \dots, |f_{in}|\} \mid 1 \leq i \leq w, 2 \leq j \leq n$ , 其中  $f_{ij} = \text{sgn}(f_{ij}) |f_{ij}|$ ,  $\text{sgn}(\cdot)$  为符号函数, 令

$$s(i) = \begin{cases} 1, & f_{ij} \geq 0 \\ 0, & f_{ij} < 0 \end{cases} \quad 1 \leq i \leq w \quad (4)$$

(4) 求取水印密钥  $K = \{k(i) = s(i) \oplus x(i) \mid 1 \leq i \leq w\}$  (其中  $\oplus$  为异或运算),  $x(i) \in \{0, 1\}$ ,  $x(i)$  为二值图像的像素点值。

### 2) 水印提取。

设待检测的音频信号为  $F'$ , 水印提取过程如下:

(1) 重复水印嵌入时的步骤(1)、(2), 得到待检测音频信号的  $w$  组 DCT 系数, 依式(4)同样的规则获取序列  $S'$ ;

(2) 提取的水印图像  $X' = \{x'(i) = s'(i) \oplus k(i) \mid 1 \leq i \leq w\}$ ;

(3) 求提取的水印图像与原始水印图像的归一化互相关值, 将其与设定的阈值比较, 判断是否有水印嵌入。

## 2.2 基于保存系数位置的 DCT 系数符号音频零水印算法

当一组内两个最大系数数值很接近, 但符号相反时, 经过转码等信号处理操作后, DCT 系数数值的轻微改动就会引起最大值位置偏移, 若仍按 2.1 节所述方法选择每组的最大值提取水印, 则容易导致水印的误提取。为解决上述问题, 可以考虑在水印嵌入的同时记下水印对应系数的位置, 提取水印时, 只需根据对应位置的系数符号依次提取水印。

### 1) 水印嵌入。

(1) 重复 2.1 节水印嵌入的步骤(1)、(2)、(3), 得到序列  $S$ ;

(2) 对任一位  $s(i)$ , 依次保存嵌入系数的位置  $j$ , 并将其转化为合适的二进制数表示, 记为  $K_L$ 。求取水印密钥  $K = \{k(i) = s(i) \oplus x(i) \mid 1 \leq i \leq w\}$ 。

### 2) 水印提取。

(1) 提取水印时, 重复 2.1 节的步骤(1)、(2) 获得待检测音频信号的  $w$  组 DCT 系数, 按照  $K_L$  的标识依次寻找每组嵌入的水印, 得到序列  $S'$ ;

(2) 提取的水印图像  $X' = \{x'(i) = s'(i) \oplus k(i) \mid 1 \leq i \leq w\}$ ;

(3) 求提取的水印图像与原始水印图像的归一化互相关值, 将其与设定的阈值比较, 判断是否有水印嵌入。

## 3 基于 DCT 系数符号的多重零水印算法

基于位置保存的 DCT 系数符号零水印算法在保存密钥时, 还需将水印系数的位置保存, 通过水印的多重嵌入, 可以省去对水印位置的保存, 又不降低水印的鲁棒性。

由 2.1 节得到  $w$  组 DCT 系数, 根据所有第  $j$  ( $2 \leq j \leq n$ ) 位 DCT 系数的符号嵌入一重水印, 共可获得嵌入的  $(n-1)$  重密钥

$$\{k_{12}, k_{22}, \dots, k_{n2}\}, \dots, \{k_{1j}, k_{2j}, \dots, k_{wj}\}, \dots, \{k_{1n}, k_{2n}, \dots, k_{wn}\}$$

其中, 密钥  $K = \{k_{ij} = f_{ij} \oplus x_i \mid 1 \leq i \leq w, 2 \leq j \leq n\}$ 。

提取水印时, 重复 2.1 节的步骤(1)、(2), 得到待检测文件的 DCT 系数  $f'_{ij}$  与  $k_{ij}$  异或得到嵌入的  $(n-1)$  重水印。

$$G = \{g_{ij} \mid g_{ij} = f'_{ij} \oplus k_{ij}, 1 \leq i \leq w, 2 \leq j \leq n\} \quad (5)$$

若设定  $n$  为偶数, 共可提取奇数重水印, 按以下规则提取第  $i$  位水印:

$$x_i = \begin{cases} 1, & \sum_{j=2}^n g_{ij} \geq \frac{n}{2} \\ 0, & \sum_{j=2}^n g_{ij} < \frac{n}{2} \end{cases} \quad 1 \leq i \leq w \quad (6)$$

得到提取的水印图像  $X' = \{x(i) \mid 1 \leq i \leq w\}$ , 求提取的水印图像与原始水印图像的归一化互相关值, 将其与设定的阈值比较, 判断是否有水印嵌入。

## 4 实验结果

为了验证算法的有效性, 取一首时长为 278 s, 码率为 128 kbps, 采样率为 44.1 kHz, 16 位双声道音频文件, 水印为  $64 \times 64$  的二值图片, 进行水印提取的鲁棒性测试, 通过归一化互相关(NC)值来表征水印的提取率。

### 4.1 水印的鲁棒性测试

从图 3 ~ 图 5 测试结果可知, 基于控制因子嵌入

和多重嵌入能够抵抗常规信号处理:重采样、重滤波、MP3 转码等对水印的破坏,保证对音频水印的较高提取率。

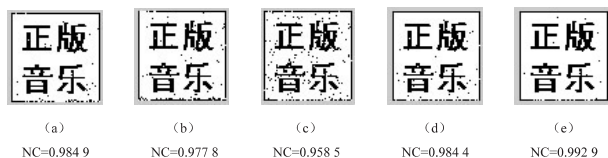


图3 基于不保存位置的 DCT 系数符号零水印算法



图4 基于保存位置的 DCT 系数符号零水印算法



图5 自适应多重嵌入的水印算法

图中,(a)为重采样(44 kHz-12 kHz-44 kHz);(b)为重量化(16 bits-8 bits-16 bits);(c)为 MP3 直接转码;(d)为 MP3 变码率转码(192 kbps);(e)为 MP3 变码率转码(320 kbps)。

## 4.2 水印的可靠性测试

为了检验算法的可靠性,对包含与密钥匹配的原始音频文件在内的 50 首音频文件进行归一化互相关测试,得到原始语音信号的 NC 值集中于 0.99 左右,而其他音频信号对应的 NC 值则集中于 0.7 左右,保证了算法可以从与密钥匹配的音频文件中正确提取水印,同时避免了从不匹配密钥的音频文件中提取出水印信号,从而保证了算法的可靠性。

## 5 结束语

文中提出了一种新的基于 DCT 系数符号的音频零水印算法,零水印算法在透明性上相对于传统水印算法具有无法提及的优势。

文中采取以下方法着重于提高水印的鲁棒性:首先对音频数据的绝对值取算数平均值操作,并选取数值较大的 DCT 系数的符号做水印嵌入,每嵌入一个水印信息只需做一次 DCT 变换,计算简单,运算时间少。算法分别实现了基于最大数值系数的嵌入和多重嵌入的零水印算法,仿真实验可以看出,水印算法可以抵抗

转码等常规信号处理的破坏,水印提取率高,很好地解决了传统水印嵌入时透明性和鲁棒性的矛盾。面对当下迫在眉睫的网络音频版权问题,相对于传统的音频水印算法,该算法不但保留了原始音频文件的音质,而且算法非常简单,在对海量的音频文件加水印及实时检测水印信息上,有其极大的现实意义。

## 参考文献:

- [1] 吴国华,吴秦寒,周晓栋.一种基于小波变换的音频零水印算法[J].机电工程,2009,26(9):16-19.
- [2] 孙圣和,陆哲明.数字水印处理技术[J].电子学报,2000,28(8):85-90.
- [3] 金 聪.数字水印理论与技术[M].北京:清华大学出版社,2008.
- [4] 刘广起,郑晓势,赵彦玲.基于奇异值分解的 DCT 域音频数字水印算法[J].电声技术,2010(3):54-58.
- [5] 温 泉,孙钺锋,王树勋.基于零水印的数字水印技术研究[C]//全国第三届信息隐藏学术研讨会论文集.西安:西安电子科技大学出版社,2001.
- [6] Hu Chaoju, Wang Xuning. Zero watermark protocol based on time-stamp and digital signature[C]//Proc of international forum on information technology and applications. [s. l.]: [s. n.], 2009:193-196.
- [7] 陈 宁.数字水印中的关键技术研究[D].上海:上海交通大学,2008.
- [8] Zhou Yun, Wang Randing, Yan Diqun. A robust audio multi-watermarking algorithm based on vector quantization [C]//Proc of 2nd international conference on future computer and communication. Wuhan: [s. n.], 2011:625-629.
- [9] 黄 松,张 伟,韦鹏程,等.一个基于矢量量化的数字水印算法[J].计算机工程与应用,2006,42(19):96-98.
- [10] Gao Liting, Zhao Wei, Wen Xiumei, et al. An audio zero-watermark algorithm based on FFT[C]//Proc of 2nd international conference on networking and digital society. [s. l.]: [s. n.], 2010:274-277.
- [11] Xiong Yiqun, Wang Ranging. An audio zero-watermark algorithm combined DCT with Zernike moments [C]//Proc of international conference on digital object identifier. [s. l.]: [s. n.], 2008:11-15.
- [12] Li Xueming, He Guangjun. A new audio zero-watermark algorithm for copyright protection based on audio segmentation and wavelet coefficients mapping [C]//Proc of international conference on digital content, multimedia technology and its applications. [s. l.]: [s. n.], 2011:22-26.

# 基于DCT系数符号的音频零水印算法

作者：孙瑞鹏, 徐海涛, SUN Rui-peng, XU Hai-tao

作者单位：孙瑞鹏, SUN Rui-peng(上海大学 机电工程与自动化学院, 上海, 200072), 徐海涛, XU Hai-tao(我友网络科技有限公司, 上海, 201800)

刊名：计算机技术与发展 

英文刊名：Computer Technology and Development

年, 卷(期)：2014(5)

本文链接：[http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_wjfz201405035.aspx](http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_wjfz201405035.aspx)