

基于小波包域听觉感知分析的统计音频水印算法

全笑梅,张鸿宾

(北京工业大学计算机学院,北京 100022)

摘 要: 现有的统计音频水印算法对不可感知性缺乏保证. 本文根据宿主音频信号的感知和统计特性,提出一种统计音频水印算法. 该算法利用自适应小波包分解对宿主音频信号进行听觉感知特性分析,在小波包域内直接计算掩蔽阈值,并用其控制水印的嵌入强度. 该算法采用统计方法自适应地在听觉感知重要的有调成份上嵌入水印,保证了水印的不可感知性和鲁棒性. 水印检测错误率分析和实验结果表明本文算法能保证音频感知质量并能抵抗各种攻击.

关键词: 数字音频水印; 心理声学模型; 小波包分解

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2007) 04-0673-06

Statistical Audio Watermarking Algorithm Based on Auditory Analysis in Wavelet Packet Domain

QUAN Xiao-mei, ZHANG Hong-bin

(Computer Institute, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract: Current statistical audio watermarking can't guarantee imperceptibility. The proposed scheme in this paper uses a statistical method to embed watermark in the tonal components in wavelet packet domain and integrates psychoacoustic analysis to control watermark strength, which makes watermark inaudible. Error detection rate analysis and experimental results show that the proposed method is inaudible and sustainable against common signal processing manipulations and malicious attacks.

Key words: digital audio watermarking; psychoacoustic model; wavelet packet decomposition

1 引言

近年来,数字媒体的应用取得了很大的进展. 数字媒体的知识产权保护和真实性、完整性的认证等问题已成为人们关注的焦点^[1,2],推动了以版权保护、完整性认证等为目标的数字水印和信息隐藏技术的研究.

不可感知性和鲁棒性是对数字水印算法的两个基本要求. 早期的水印算法为了保证不可感知性把水印嵌入到听觉感知不重要的成份中,这种算法虽简单但鲁棒性较差. 为了提高鲁棒性,水印应该嵌入到感知重要的成份中,而不可感知性应由感知模型控制^[3,4].

在数字水印算法中,有一类是统计算法,典型的有 Patchwork 算法^[5~7]. 因为这类算法充分利用了宿主信号的统计特性,所以具有较好的鲁棒性. 但是目前的统计水印算法均未考虑宿主信号的感知特性,使水印的不可感知性还缺乏保证. 本文提出了一种新的统计音频水印算法,根据宿主音频信号的感知和统计特征,用统计方

法在感知重要的有调成份上嵌入水印,嵌入强度由听觉掩蔽阈值控制,保证了水印的不可感知性和鲁棒性. 与目前的统计水印算法相比,本文算法有如下特点:

首先,本文在统计算法中加入听觉感知分析,更好地保证了不可感知性,在计算听觉掩蔽阈值时,本文把自适应小波包分解引入到心理声学模型的计算中,不但简化了心理声学模型的计算,而且使得到的听觉掩蔽阈值更接近真实值;其次,由于本文自适应地在宿主信号的有调成份上嵌入水印,使其可以抵抗压缩和去同步等攻击方法,进一步提高了算法的鲁棒性;最后,本文算法克服了 Patchwork 算法水印嵌入位率较低的缺点,通过构造不同的水印索引集合,使得水印嵌入位率达到 Patchwork 算法的两倍,提高了算法的实用价值.

下面第2节详细描述本文对宿主音频信号进行的听觉感知特性分析. 第3节、第4节分别描述本文统计音频水印的嵌入和检测算法,并给出水印的检测错误率. 第5节分析本文算法性能. 第6节给出部分实验结

果. 最后在第 7 节总结全文.

2 听觉感知特性分析

与人类的其它感官相比,人耳具有较高的灵敏度. 因此音频水印算法比图像、视频水印更加依赖宿主信号的感知冗余. 听觉感知冗余由人类听觉系统中的掩蔽现象(Masking)产生. 所谓掩蔽现象是指一个强的音频信号会全部或部分地遮盖住一个较弱的音频信号,使得人耳听不见或听不清这个较弱的信号. 掩蔽现象一般用听觉掩蔽阈值来衡量. 在音频水印算法中估计听觉掩蔽阈值并进行感知冗余性分析,是为了在不降低音频感知质量的前提下,根据宿主信号的特点更好地确定水印嵌入的位置和强度,提高水印算法性能. 目前常用 MPEG 标准^[8]的心理声学模型估计听觉掩蔽阈值. 该模型用多相滤波器完成音频信号从时域到频域的映射,然后用快速傅立叶变换 FFT 计算掩蔽阈值. 但是 MPEG 的心理声学模型存在一些不足^[9],因为 MPEG 模型的子带划分与人类听觉系统 HAS(Human Auditory System)的临界频带(Critical Band)不符,导致算出的掩蔽阈值较为保守;此外,由于多相滤波器的频率分辨率不能提供计算阈值所需精度,因此还需引入 FFT,加大了计算量. 本文通过把自适应小波包分解引入到心理声学模型的计算中,使小波包分解所得子带与临界频带更为接近并且为掩蔽阈值的计算提供了足够的频率分辨率,因此本文可以直接在小波包域计算掩蔽阈值,简化了心理声学模型的计算.

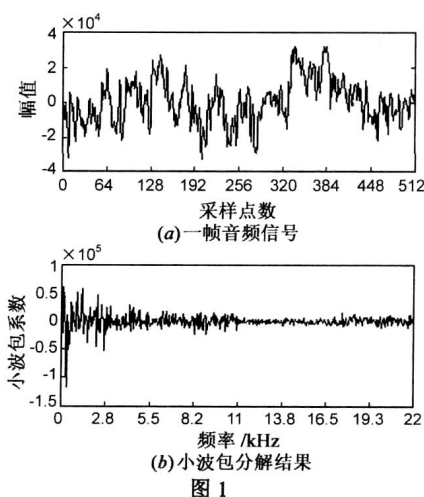


图 1

本文采用 Sinha 提出的小波包滤波器^[10],按帧把音频信号分解为 29 个子带. 图 1 所示为一帧音频信号及其小波包分解结果. 小波包分解之后再改进的 MPEG1 心理声学模型 I 计算每个子带的掩蔽阈值,步骤如下:

步骤 1 根据小波包域的能量密度谱确定每个子

带的声压级. 设 $S(z)$ 为小波包域信号, z 为信号对应的临界频带率. 临界频带率是感知频率的单位,用巴克(bark)表示. 频率 f (Hz) 与临界频带率 z (Bark) 的转换公式为:

$$z = 13 \tan^{-1} \left(\frac{0.76f}{1000} \right) + 3.5 \tan^{-1} \left(\left(\frac{f}{7500} \right)^2 \right) \quad (1)$$

则在 z 点的能量密度 $X(z)$ 为:

$$X(z) = 10 \log |S(z)|^2 \text{dB} \quad (2)$$

每个子带内最大的能量密度为该子带的声压级.

步骤 2 辨别有调和无调成份. 找出能量密度谱中的极值,如果相邻极值相差超过 7dB 且不小于 z 点对应的安静状态下的绝对阈值,则标记该极值为有调成份 $Y(z)$. 每个子带内剩余谱线的总和形成该子带无调成份的声压级. 有调成份通常为纯音成份,无调成份为类似于噪音的成份. 图 2 所示为音频帧的能量密度谱及有调成份.

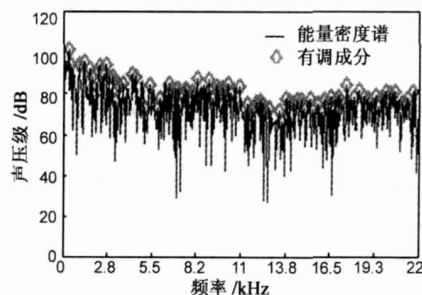


图 2 音频帧的能量密度谱及有调成份

步骤 3 计算单独掩蔽阈值. 首先确定 z_j 处有调和无调掩蔽成份的掩蔽指数 av_{tm} , av_{nm} :

$$\begin{cases} av_{tm} = -1.525 - 0.275z_j - 4.5 \text{ (dB)} \\ av_{nm} = -1.525 - 0.175z_j - 0.5 \text{ (dB)} \end{cases} \quad (3)$$

z_i 处有调和无调成份的掩蔽函数 v_f 是相同的:

$$v_f(z_i, z_j) = \begin{cases} 17z - 0.4X(z_i) + 11, & -3 < z < -1 \\ (0.4X(z_i) + 6)z, & z < 0 \\ -17z, & 0 < z < 1 \\ -17z + 0.15(z-1)X(z_i), & z < 8 \end{cases} \quad (4)$$

其中 z_i 和 z_j 分别为被掩蔽处和掩蔽源的临界频带率,二者之间的距离为 $z = z_i - z_j$. 则在 z_i 处,有调和无调成份的单独掩蔽阈值分别为 LT_{tm} 和 LT_{nm} :

$$\begin{cases} LT_{tm}(z_i, z_j) = X_{tm}(z_j) + av_{tm} + v_f(z_i, z_j) \\ LT_{nm}(z_i, z_j) = X_{nm}(z_j) + av_{nm} + v_f(z_i, z_j) \end{cases} \quad (5)$$

步骤 4 计算总掩蔽阈值和子带掩蔽阈值. 总掩蔽阈值为:

$$LT_g(z_i) = 10 \log_{10} \left(10^{LT_q(z_i)/10} + \sum_{j=1}^{N_s} 10^{LT_{tm}(z_i, z_j)/10} + \sum_{j=1}^{N_n} 10^{LT_{nm}(z_i, z_j)/10} \right) \text{dB} \quad (6)$$

其中 LT_q 为安静状态下的绝对阈值, N_i 和 N_n 分别为有调和无调成份的个数. 子带掩蔽阈值 LT 为子带内最小的总掩蔽阈值.

本文算法用子带掩蔽阈值 LT 自适应地确定水印的嵌入强度, 使得因水印引入的失真小于相应的子带掩蔽阈值, 保证了音频质量在水印嵌入前后在听觉感知上是一致的.

3 水印嵌入算法

CD 质量的音频信号通常含有大量数据, 这使得用统计方法嵌入水印成为可能. 本文基于 Patchwork 算法, 根据音频媒体的统计和感知特性, 选择宿主音频信号中听觉感知最重要的成份, 即有调成份, 作为水印嵌入集合, 并用统计方法嵌入水印. 通过在水印和随机选择的水印索引集合之间建立映射, 每次嵌入两位水印. 这样本文算法的水印嵌入率就达到传统 Patchwork 算法的两倍.

设一帧中有 N 个有调成份, 每次嵌入的两位水印是集合 $\{00, 01, 10, 11\}$ 中的一个元素, 则嵌入算法的具体步骤如下:

步骤 1 用密钥和待嵌入的两位水印随机地选择两个水印索引集合 $A_i |_{i=0,1} = \{a_j, j = 1, \dots, n\}$, $B_i |_{i=0,1} = \{b_j, j = 1, \dots, n\}$, $2n = N$. 索引集合的选取与待嵌水印的关系如图 3 所示. 例如: 若待嵌水印为 10, 则选择集合 A_1 和 B_0 .

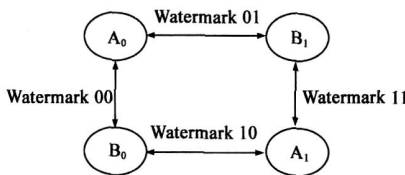


图 3 索引集合选择规则

步骤 2 设 LT_a, LT_b 分别为集合 A 和 B 对应的子带总掩蔽阈值, 按照下面的函数嵌入水印:

$$\begin{aligned} a &= a + LT_a * \\ b &= b + LT_b * \end{aligned} \quad (7)$$

其中参数 $(0, 1)$ 决定水印的嵌入强度, 其值与宿主信号的统计和感知特性相适应. 设当前子带掩蔽阈值与样本均值的比为 α . 若 $\alpha < 1$, 说明该有调成份上可嵌入的水印量较小, 此时水印嵌入强度与 α 成正比; 否则, 说明可嵌入的水印量较大, α 调整为 0.95.

$$\alpha = \begin{cases} \frac{LT_a + LT_b}{a + b} & < 1 \\ 0.95 & 1 \end{cases} \quad (8)$$

步骤 3 用嵌入水印的系数代替原来的系数, 进行小波包逆变换. 因为 $\alpha \in (0, 1)$, 所以水印的嵌入不会引起音频信号感知质量的下降.

4 水印检测算法

通过比较索引集合上检验统计量的值, 嵌入的水印可被检测出来. 检测步骤如下:

步骤 1 对音频信号进行与嵌入时相同的小波包分解, 利用密钥和 2 位水印产生 4 个索引集合: A_0, A_1, B_0 和 B_1 . 在上述 4 个备选集合上分别计算样本均值和样本方差:

$$\bar{a}_i |_{i=0,1} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_{ii}, \bar{b}_j |_{j=0,1} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n b_{jj} \quad (9)$$

$$S_{A_i}^2 |_{i=0,1} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (a_{ii} - \bar{a}_i)^2, \quad (10)$$

$$S_{B_j}^2 |_{j=0,1} = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (b_{jj} - \bar{b}_j)^2$$

步骤 2 计算检验统计量:

$$T_{ij} = \frac{\sqrt{\frac{n}{2}} (\bar{a}_i - \bar{b}_j)}{\sqrt{\frac{(n-1)S_{A_i}^2 + (n-1)S_{B_j}^2}{2(n-1)}}} \quad (11)$$

设 $T_{pq} = \max [T_{ij}]_{i,j=0,1}$, T_m 为预先设定的检测阈值, 若 $T_{pq} > T_m$, 则我们认为在集合 A_p 和 B_q 上有水印 pq , 否则我们认为在集合 A_0, A_1, B_0 和 B_1 上无水印嵌入.

为了确定水印的错误检测率, 定量地分析本文水印算法的鲁棒性, 我们提出如下的假设检验, 其中 H_0 为原假设, H_1 为备择假设.

H_0 : 索引集合中没有嵌入水印;

H_1 : 索引集合中嵌入水印.

若索引集合中嵌入水印, 则检验统计量 T 的概率密度函数为 $f_1(t)$, 否则, 若没有嵌入水印, T 的概率密度函数为 $f_0(t)$. 设索引集合的元素服从参数为 μ 的正态分布, 令 $\mu = LT \cdot \alpha$, 则:

(1) 当 H_0 为真时:

$$\begin{aligned} a_i |_{i=0,1} &\sim N(\mu, \sigma^2), b_i |_{i=0,1} \sim N(\mu, \sigma^2), \\ \bar{a}_i |_{i=0,1} &\sim N\left(\mu, \frac{\sigma^2}{n}\right), \bar{b}_j |_{j=0,1} \sim N\left(\mu, \frac{\sigma^2}{n}\right), \\ \bar{a}_i - \bar{b}_j &\sim N\left(0, \frac{2\sigma^2}{n}\right) \end{aligned} \quad (12)$$

因此有 $T \sim f_0(t) = t(2n-2)$, $t(2n-2)$ 表示自由度为 $2n-2$ 的 t 分布.

(2) 当 H_1 为真时:

$$\begin{aligned} a_i |_{i=0,1} &\sim N(\mu + \alpha, \sigma^2), b_i |_{i=0,1} \sim N(\mu - \alpha, \sigma^2), \\ \bar{a}_i |_{i=0,1} &\sim N\left(\mu + \alpha, \frac{\sigma^2}{n}\right), \bar{b}_j |_{j=0,1} \sim N\left(\mu - \alpha, \frac{\sigma^2}{n}\right), \\ \bar{a}_i - \bar{b}_j &\sim N\left(2\alpha, \frac{2\sigma^2}{n}\right). \end{aligned} \quad (13)$$

因此有 $T \sim t(2n-2, 2)$, $t(2n-2, 2)$ 表示具有自由度 $2n-2$ 和非中心参数 2 的非中心 t 分布.

水印检测的各种错误率, 包括假设检验的第 I 类错误率(拒绝 H_0 但实际上没有嵌入水印), 第 II 类错误率(没有拒绝 H_0 但实际上有水印嵌入), 及检测的位错率 BER(Bit Error Rate) 可计算如下:

(1) 第 I 类错误率 P_I :

因为 $P(T_{pq} = \max[T_{ij}]_{i,j=0,1}) = \frac{1}{4}$, 所以每次嵌入两位水印 pq 时, 第 I 类错误率 为:

$$\begin{aligned} &= P(T_{pq} > T_m | H_0) \\ &= P(T_{pq} = \max[T_{ij}]_{i,j=0,1}) \int_{T_m}^{\infty} f_0(t, 2n-2) dt \\ &= \frac{1}{4} \int_{T_m}^{\infty} f_0(t, 2n-2) dt \end{aligned} \quad (14)$$

其中,

$$f_0(t, 2n-2) = \left[\frac{\Gamma\left(\frac{2n-1}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{2n-2}{2}\right)} \right] \frac{1}{\sqrt{(2n-2)} (n-1)} \left[1 + \frac{t^2}{2n-2} \right]^{-\frac{2n-1}{2}}$$

(z) 为 gamma 函数.

每两位水印 pq 重复嵌入 R 次. 显然这是 R 重贝努利试验, 设在 R 重试验中事件 $T_{pq} > T_m$ 发生 X 次. 只有当 $X \geq \frac{R}{2}$ 时, 我们才认为两位水印 pq 被成功地检测出来. 因此第 I 类总错误率为:

$$P_I = P\left(X \geq \frac{R}{2}\right) = \sum_{x=\frac{R}{2}}^R \binom{R}{x} (1-p)^x p^{R-x} \quad (15)$$

(2) 第 II 类错误率 P_{II} :

每次试验的第 II 类错误率 为:

$$\begin{aligned} &= P(T_{pq} \leq T_m | H_1) \\ &= P(T_{pq} = \max[T_{ij}]_{i,j=0,1}) \int_0^{T_m} f_1(t, 2n-2, 2) dt \\ &= \frac{1}{4} \int_0^{T_m} f_1(t, 2n-2, 2) dt \end{aligned} \quad (16)$$

其中,

$$f_1(t, n, 2) = \frac{n^{n/2} n!}{2^n e^{-t^2/2} (n+t^2)^{n/2} \left(\frac{n}{2}\right)!} \left\{ \frac{\sqrt{2} {}_1F_1\left(\frac{n}{2}+1; \frac{3}{2}; \frac{t^2}{2(n+t^2)}\right)}{(n+t^2) \left(\frac{1}{2}(n+1)\right)!} + \frac{{}_1F_1\left(\frac{1}{2}(n+1); \frac{1}{2}; \frac{t^2}{2(n+t^2)}\right)}{\sqrt{n+t^2} \left(\frac{1}{2}(n+1)\right)!} \right\} \quad (17)$$

(z) 为 gamma 函数, ${}_1F_1(a; b; z)$ 为合流超几何函数,

$${}_1F_1(a; b; z) = \frac{(b)}{(b-a)} \frac{1}{(a)} \int_0^1 e^{zt} t^{a-1} (1-t)^{b-a-1} dt \quad (18)$$

所以第 II 类的总错误率为:

$$P_{II} = P\left(X < \frac{R}{2}\right) = \sum_{x=0}^{\frac{R}{2}-1} \binom{R}{x} (1-p)^x p^{R-x} \quad (19)$$

(3) 位错率(BER) P_{BER} :

位错是指检测出的两位水印与嵌入的不同. 例如: 当检测出的水印是 01, 10 或是 11 而嵌入的水印是 00, 位错就发生了. 此时的位错率用 β_{00} 表示, 类似的位错率为 β_{01} , β_{10} 和 β_{11} . 显然上述位错率相同, 即: $\beta_{00} = \beta_{01} = \beta_{10} = \beta_{11} = \beta$.

若嵌入的水印为 00 而检测出的是 01, 此时的位错率记为: β_{00-01} . 设 T_{00-01} 为概率密度函数 β_{00} 和 β_{01} 的重合点, 则:

$$\begin{aligned} \beta_{00-01} &= P(T_{01} > T_{00}, T_{01} > T_m | \text{embedded } 00) \\ &= \frac{1}{3} \int_{T_m}^{\infty} f_{00-01}(t) dt \end{aligned} \quad (20)$$

同理,

$$\begin{aligned} \beta_{00-10} &= \frac{1}{3} \int_{T_m}^{\infty} f_{00-10}(t) dt \\ \beta_{00-11} &= \frac{1}{3} \int_{T_m}^{\infty} f_{00-11}(t) dt \end{aligned} \quad (21)$$

因为 $\beta_{00} = \beta_{00-01} + \beta_{00-10} + \beta_{00-11}$, 所以每次试验的位错率为 $\beta = \beta_{00}$, 由此可得到 R 次试验的总位错率:

$$P_{BER} = P\left(X \geq \frac{R}{2}\right) = \sum_{x=\frac{R}{2}}^R \binom{R}{x} (1-p)^x p^{R-x} \quad (22)$$

5 算法性能分析

目前统计音频水印算法的工作主要集中于提高鲁棒性, 不可感知性主要是通过调整实验参数来满足. 现有的统计水印算法的嵌入位率都较低, 且不能抵抗去同步攻击, 这些都限制了统计音频水印算法的应用. 本文算法在不可感知性, 水印嵌入位率和鲁棒性三方面都比 Patchwork 算法有所改进. 本文算法的特点是:

(1) 通过把自适应小波包分解引入到心理声学模型的计算中, 使所得掩蔽阈值更加接近真实值, 用该掩蔽阈值控制水印的嵌入位置和嵌入强度, 保证了水印算法的不可感知性.

(2) 通过在两位水印和索引集间建立映射, 本文的水印嵌入位率达到 Patchwork 算法的两倍^[5~7].

(3) 根据宿主音频信号的统计和感知特性自适应地决定水印的嵌入强度, 使得本文算法可以抵抗共谋攻击, 拷贝攻击和维纳滤波等攻击^[11].

(4) 通过在有调成份上嵌入水印使得本文算法可以抵抗低位率压缩, 去同步攻击等^[4,12].

目前,一种典型的去同步攻击为时间伸缩攻击。SDMI(Secure Digital Music Initiative)认为这种攻击方式十分有效^[12,13]。抵抗这种攻击的方法主要有两种:一是估计时间的伸缩程度并加以还原;二是选择对时间伸缩不敏感的区域嵌入水印,例如 Mansour^[14]提出的算法。本文算法把水印嵌入到有调成份中,而有调成份正是对时间伸缩不敏感的区域,因此它能有效抵抗去同步攻击。

6 实验结果

我们进行了一系列实验来检验上述统计音频水印算法的性能。实验着重评价水印算法的不可感知性和鲁棒性。

实验中应用感知音频质量评价标准 PAQM(Perceptual Audio Quality Measure) 来衡量嵌入水印后的音频感知质量。1992 年,Beerends 和 Stemerink 提出感知音频质量评价标准 PAQM 的概念^[15]。该标准通过给出一个客观评分来评价音频信号的感知质量。实验和理论分析表明该客观评分与人耳对音频和语音信号的主观感知密切相关。PAQM 的基本原理是比较待测信号和参考标准信号在内耳表示上的差异,根据该差异的大小决定待测信号与参考信号的听觉感知相似度。通常把 PAQM 的评分对应到一个主观评分等级 SG(Subjective Grade),以便更为直观地了解待测信号与参考标准信号的听觉感知差异。主观评分等级共分为五等,等级越高表示待测信号的听觉感知质量越好,与参考标准信号在听觉感知上越为接近。SG 的描述见表 1。

表 1 听觉感知质量评价等级 SG

SG	听觉感知质量描述
5.0	不可感知 (Imperceptible)
4.0	可听见,但不烦人 (Perceptible, but not annoying)
3.0	轻微烦人 (Slightly annoying)
2.0	烦人 (Annoying)
1.0	非常烦人 (Very annoying)

表 2 各种攻击下的检测错误率

宿主信号 种类	攻击后的检测错误率(10^{-5})					SG
	MP3 压缩	低通 滤波	重新 采样	去同步攻击 (a)	去同步攻击 (b)	
蓝调音乐 1	27.69	27.82	27.50	27.60	28.02	4.87
蓝调音乐 2	28.11	27.69	28.33	27.93	27.84	4.90
古典音乐 1	27.51	27.48	27.60	27.53	27.56	4.75
古典音乐 2	27.43	27.48	27.40	27.82	27.79	4.83
乡村音乐 1	27.41	27.46	27.36	27.89	27.85	4.95
乡村音乐 2	27.63	27.65	27.57	27.60	27.61	4.96
民族音乐 1	28.22	27.98	27.68	28.07	28.17	4.89
民族音乐 2	28.16	28.20	27.81	28.12	28.06	4.92
流行音乐 1	28.53	28.44	27.92	28.04	27.96	4.98
流行音乐 2	27.94	27.89	27.68	28.13	28.15	4.96

为检验水印算法的性能,实验中选取了 10 个标准的 PCM 信号^[16],它们的采样频率均为 44.1kHz,量化精度为 16 位。这些 PCM 信号代表了 5 类典型音乐,即流行音乐、民族音乐、古典音乐、蓝调音乐和乡村音乐。每两位水印重复嵌入 10 次。一帧音频信号由 512 个样点组成,选择在 100(N) 个有调成份上嵌入水印。每个索引集合包含 50(n) 个元素。检测阈值设为 8(T_m)。算法在 861 帧上连续嵌入水印,大约持续 10 秒。实验包括:

- (1) MP3 压缩:压缩率为 96kbps;
- (2) 低通滤波:采用截止频率为 441Hz 的低通滤波器;
- (3) 重新采样:采用 22.05kHz 的频率重新采样;
- (4) 剪切攻击:连续嵌入两位水印 10 次以上使得当少于 116ms 的音频信号被剪切后仍能检测出水印;
- (5) 去同步攻击:在 (a) 保持音调和 (b) 提高音调 3% 的情况下,把信号长度缩短到原来的 95%。

表 2 列出了部分实验结果,实验结果显示本文算法可以保持宿主音频信号的感知质量,同时可以成功抵抗各种攻击。

7 结论

提高水印算法的鲁棒性和不可感知性一直是水印算法的研究重点。本文用统计方法在宿主音频信号的有调成份上嵌入水印,并把自适应小波包分解引入到心理声学模型的计算中,用更加接近于真实值的掩蔽阈值控制水印的嵌入强度,保证了水印的不可感知性。为了提高水印的鲁棒性,本文算法根据宿主信号的统计和感知特性将水印自适应地嵌入到宿主音频信号的听觉感知重要成份——有调成份上。本文还给出了水印检测的各种错误率。水印检测错误率和实验结果验证了本文算法的有效性。

参考文献:

- [1] Tzeng J N, Hwang W L, et al. An asymmetric subspace watermarking method for copyright protection [J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2005, 53(2): 784 - 792.
- [2] Kundur D, Hatzinakos D. Toward robust logo watermarking using multiresolution image fusion principles [J]. IEEE Trans on Multimedia, 2004, 6(1): 185 - 194.
- [3] Podilchuk C I, Delp E J. Digital watermarking: algorithms and applications [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2001, 18(4): 33 - 46.
- [4] Cox I, Kilian J, et al. Secure spread spectrum watermarking for multimedia [J]. IEEE Trans on Image Processing, 1997, 6(12): 1673 - 1687.
- [5] Bender W, Gruhl D, Morimoto N, Lu A. Techniques for data hiding [J]. IBM Syst Journal, 1996, 35(3): 313 - 336.

- [6] Arnold M. Audio watermarking :features ,applications and algorithms [A]. IEEE Int Conf Multimedia and Expo [C]. New York ,NY,USA :IEEE,2000. 1013 - 1016.
- [7] Yeo I K, Kim H J. Modified patchwork algorithm :a novel audio watermarking scheme [J]. IEEE Trans Speech and Audio Processing ,2003 ,11 (4) :381 - 386.
- [8] ISO/ IEC IS11172-3. Coding of moving pictures and associated audio for digital storage media at up to about 1.5 Mbit/s —part 3 :audio[S]. 1992.
- [9] Pan D. A tutorial on MPEG/ audio compression[J]. IEEE Multimedia ,1995 ,2(2) :60 - 74.
- [10] Sinha D, Tewfik A. Low bit rate transparent audio compression using adapted wavelets [J]. IEEE Trans. Signal Processing ,1993 ,41 (12) :3464 - 3479.
- [11] Arnold M. Attacks on digital audio watermarks and countermeasures [A]. IEEE Int Conf WEB Delivering of Music [C]. Darmstadt , Germany :IEEE,2003. 1 - 8.
- [12] Wu M, Craver S A, Felten E W, Liu B. Analysis attacks on SDMI audio watermarks [A]. IEEE Int. Conf. Acoustics , Speech, and Signal Processing [C]. Salt Lake City , UT, USA : IEEE,2001. 1369 - 1372.
- [13] Secure Digital Music Initiative [OL]. <http://www.sdmi.org>.
- [14] Mansour M F, Tewfik A H. Data embedding in audio using time-scale modification [J]. IEEE Trans Speech and Audio Processing ,2005 ,13 (3) :432 - 440.
- [15] J G Beerends, J A Stemerdink. A perceptual audio quality measure based on a psychoacoustics sound representation [J]. Journal of Audio Engineering Society ,1992 ,12 (40) :963 - 978.
- [16] Gordy J D, Bruton L T. Performance evaluation of digital audio watermarking algorithms [A]. The 43rd IEEE Midwest Symposium on Circuits and Systems [C]. Lansing , MI, USA : IEEE,2000. 456 - 459.

作者简介 :



全笑梅 女,1975年10月生于山西省太原市,工学博士,IET会员.主要研究方向为多媒体信息安全、数字水印技术、数字音频信号处理等.
E-mail :xmquan @emails. bjut. edu. cn

张鸿宾 男,教授、博士生导师.1944年9月出生于河北,1968年清华大学自动控制系毕业,1981年清华大学模式识别与智能控制专业硕士研究生毕业,1986~1989年日本京都大学客座研究员,1993~1994年美国RPI访问学者,现为北京工业大学计算机学院教授.目前主要研究方向是模式识别、图像处理和计算机视觉、信息隐藏和数字水印、数字几何处理等. E-mail :zhh @public. bta. net. cn