

基于盲源分离理论和人类听觉掩蔽效应的数字音频水印方法

马晓红*, 王羽中, 殷福亮

(大连理工大学 电子与信息工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 将盲源分离理论应用于数字音频水印技术, 以达到在宿主信号未知的情况下分离出嵌入水印信号的目的; 把生成混沌序列的初始值和宿主信号的时、频掩蔽信号作为密钥信息, 生成嵌入水印信号, 充分保证了水印检测的安全性; 引入人类听觉系统 (human auditory system, HAS) 掩蔽效应的概念, 使嵌入水印信号完全自适应于宿主信号, 以提高算法的鲁棒性. 实验结果表明, 嵌入水印的音频信号没有明显的听觉失真, 满足了音频水印不可听性的要求; 经过低通滤波、重采样、添加噪声、剪切和 mp3 压缩等攻击后, 嵌入水印信号和分离出的水印信号之间的相关函数较进行频域和时域掩蔽作用之前, 具有更加明显的二值分布特征, 算法的鲁棒性明显优于掩蔽作用之前; 同时, 该方法无需外加同步信息, 就可以取得良好的同步效果.

关键词: 音频水印; 盲源分离; 独立分量分析; 人类听觉系统掩蔽效应

中图分类号: TP399 **文献标识码:** A

0 引言

近年来, 网络 and 多媒体技术的飞速发展为人们存取数字化音频信息提供了极大的便利, 人们可以通过互联网发布自己的音频产品及进行电子商务活动. 这样, 一方面促进了社会的进步和发展, 另一方面也带来了十分严峻的问题: 作品的侵权更加容易, 篡改也更加方便. 因此, 如何有效地保护音频产品的版权问题引起了学术界和产业界的高度关注, 音频水印技术就是在这种情况下应运而生的. 它具有如下两个基本特性: 不可听性和鲁棒性. 一个好的音频水印方法应该能够在保证不可听性的前提下尽量获得较强的鲁棒性. 已有的音频水印方法大致可以归纳为两大类: 时域方法和变换域方法. 前者是指通过修改宿主信号的时域采样值嵌入水印的方法, 典型的时域方法有最低有效位 (LSB) 法^[1] 和回声隐藏法^[2] 等; 后者是指通过修改宿主信号的变换域系数来嵌入水印信息的方法^[3-5].

文献 [6] 中给出了一种基于盲源分离理论的时域数字音频水印方法, 该方法使用扩频后的 m 序列作为水印信息嵌入到宿主信号中. 虽然可以保证隐秘信号的不可听性, 但是由于水印信号嵌

入时强度是固定的, 对低通滤波和重采样攻击的鲁棒性并不十分理想. 针对这一问题, 本文将人类听觉系统 (HAS) 掩蔽效应引入其中, 以提高算法的鲁棒性.

1 水印的嵌入

水印嵌入原理框图如图 1 所示. 可以看出, 水印嵌入部分由原始水印信号产生、嵌入水印生成和水印信号嵌入三部分组成.

1.1 原始水印信号的产生

首先, 由 n 级线性反馈移位寄存器生成一个长度为 $l_m = 2^n - 1$ 的 m 序列;

然后, 利用混沌序列形式简单、对初始条件敏感和具有白噪声统计特性等优点, 由式 (1) 产生一个长度为 l_c 的混沌序列 $c = \{c_k, 0 \leq k < l_c - 1\}$ 作为扩频序列;

$$\alpha_{k+1} = \lfloor \alpha_k (1 - \alpha_k) \rfloor,$$

$$\alpha_0 \in (0, 1) \text{ and } 3.569\ 945\ 6 < \alpha_0 \leq 4 \quad (1)$$

最后, 用混沌序列对 m 序列进行直接序列扩频, 得到一个载频为 f_c 的扩频信号作为原始水印信号 w .

收稿日期: 2006-01-20; 修回日期: 2007-07-25.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60575011, 60372082); 辽宁省自然科学基金资助项目 (20052181).

作者简介: 马晓红* (1967-), 女, 博士, 副教授; 殷福亮 (1962-), 男, 教授, 博士生导师.

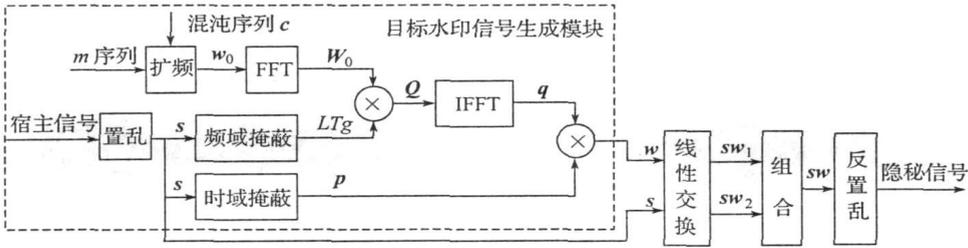


图 1 水印嵌入原理框图

Fig. 1 The diagram of watermark embedding

1.2 利用掩蔽效应生成嵌入水印信号

声音的掩蔽效应是指一个声音的存在影响人耳对另一个声音的听觉能力. 掩蔽效应分为频域掩蔽和时域掩蔽两类,前者是指一个强纯音会掩蔽在其频率附近同时发生的弱纯音;后者是指一个强音会掩蔽在其前后短暂发生的弱音^[7]. 本文利用心理声学模型 I 所描述的掩蔽模型来计算宿主信号的频域掩蔽效应,确保水印信号的能量小于宿主信号的能量;通过计算宿主信号时域的包络近似其时域掩蔽效应,使水印信号时域的幅度和宿主信号的幅度相一致,从而使频、时掩蔽后的水印信号完全自适应于宿主信号,以增强水印算法的鲁棒性. 生成嵌入水印信号的步骤如下:

- (a) 将原始水印信号 $w(t)$ 变换到频域,得到频域系数 $W_0(k)$;
- (b) 计算宿主信号 $s(t)$ 的频域掩蔽信号 $LTg(k)$ ^[8];
- (c) 用 $LTg(k)$ 作为权重,作用于 $W_0(k)$,得到 $Q(k) = W_0(k)LTg(k)$,将 $Q(k)$ 变换回时域,得到 $q(t)$;
- (d) 计算宿主信号 $s(t)$ 的时域掩蔽信号 $p(t)$,这里用宿主信号的时域包络近似代替宿主信号的时域掩蔽信号;
- (e) 最终得到嵌入水印信号 $w(t) = p(t)q(t)$.

为了保证水印的安全性,同时实现盲检测,将频域掩蔽信号 $LTg(k)$ 和时域掩蔽信号 $p(t)$ 与生成混沌序列的初始值 ω 一起作为水印检测时的密钥.

1.3 水印信号的嵌入

为了防止盗版者在水印检测端轻易地恢复出宿主信号的估计值,首先把宿主信号进行置乱. 由于置乱后的宿主信号和水印信号由不同的信源产生,两者之间统计独立. 假设嵌入水印信号 w 和宿主信号 s 的长度均为 L ,将二者按盲源分离问题的瞬时混合模型进行混合,得到两个观测向量 sw_1 和 sw_2 ,即

$$\begin{pmatrix} sw_1 \\ sw_2 \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} s \\ w \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s \\ w \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中, $a_1 \gg b_1, a_2 \gg b_2$,以保证嵌入水印的不可听性. 再将 sw_1 和 sw_2 进行组合,得到嵌入水印后的隐秘信号 sw .

2 水印的检测

水印提取原理框图如图 2 所示. 首先,将隐秘信号以相同方式进行置乱,用 sw' 表示,把 sw' 拆分成 sw'_1 和 sw'_2 ,作为两个观测向量;其次,利用文献 [9] 中所述的 FastICA 算法对 sw'_1 和 sw'_2 进行分离,得到宿主信号 s 和嵌入水印 w 的估计值 \hat{s} 和 \hat{w} . 本文生成的水印信号为亚高斯信号,使用的宿主信号为超高斯信号,因而可以借助四阶统计量判断出哪一路是信号 w ;再次,用嵌入水印时保留的密钥信息生成与水印嵌入部分相同的嵌入水印信号 w ;最后,通过计算 w 和其估计值 \hat{w} 之间的相关性来判断隐秘信号中是否存在水印信息.

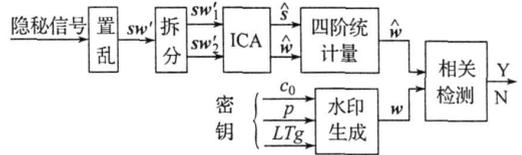


图 2 水印检测原理框图

Fig. 2 The diagram of watermark detecting

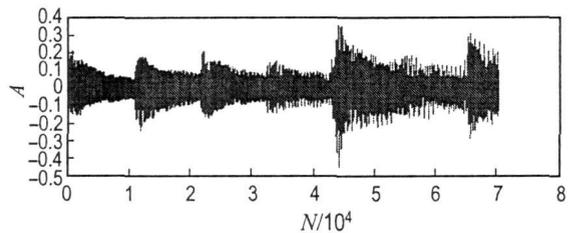
3 实验结果

本文选用采样率为 44.1 kHz 量化位数为 16 位的音乐信号作为宿主信号. 由 $n = 5$ 级线性反馈移位寄存器生成一个长度为 $l_m = 31$ 的 m 序列,再用混沌序列对其进行 8 倍扩频(载频为 $f_c = 100$ Hz) 得到原始水印信号.

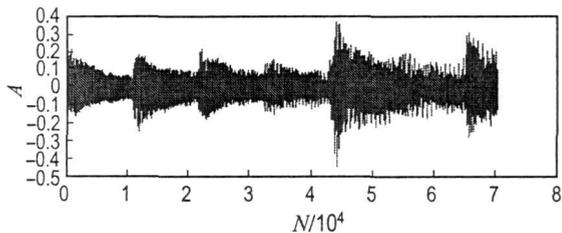
嵌入水印前的宿主信号和嵌入水印后的隐秘信号时域波形图如图 3 所示. 由图可以看出,含有水印信息的隐秘信号和宿主信号在波形上几乎没有差别,听音测试时也感觉不到二者的差异,满足了音频水印不可听性的要求. 图 4 示出了宿主信号的频域和时域掩蔽信号,图 5 示出了原始水印和经过掩蔽作用后的嵌入水印信号的波形图.

由图 5可以看出,受到掩蔽作用后的水印信号幅值完全自适应于宿主信号. 图 6(a)和 6(b)

示出了用正确密钥和错误密钥(1% 误差)进行水印检测时的相关检测结果,可以看出,即使在密钥



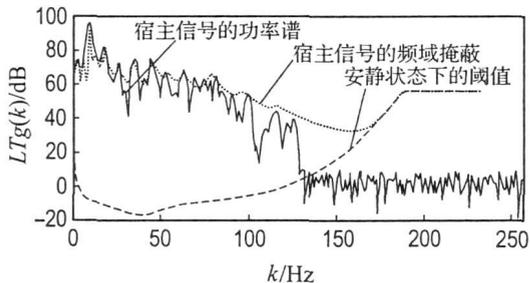
(a) 宿主信号



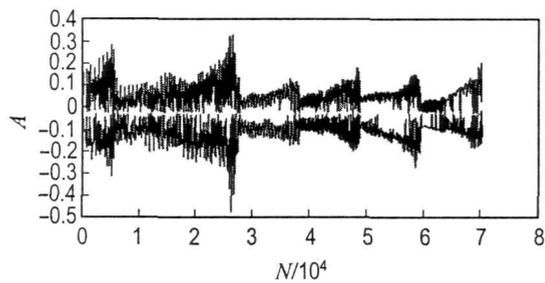
(b) 隐秘信号

图 3 音频信号时域波形图

Fig. 3 The waveforms of audio signal



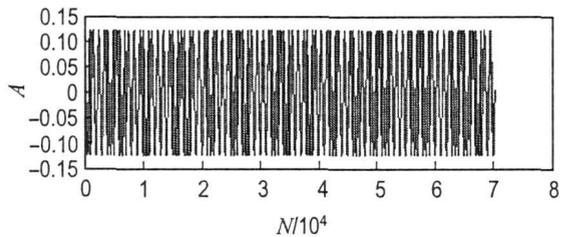
(a) 频域掩蔽信号



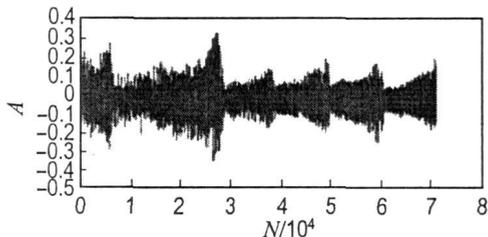
(b) 时域掩蔽信号

图 4 频域和时域掩蔽信号

Fig. 4 The masking signals in time domain and frequency domain



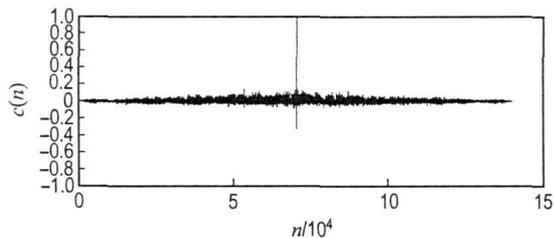
(a) 原始水印信号



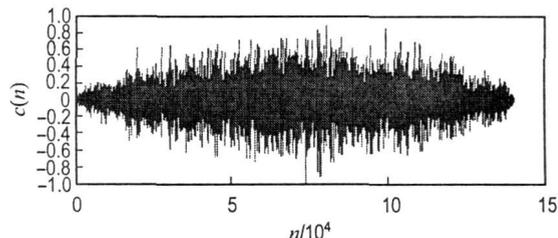
(b) 嵌入水印信号

图 5 水印信号波形图

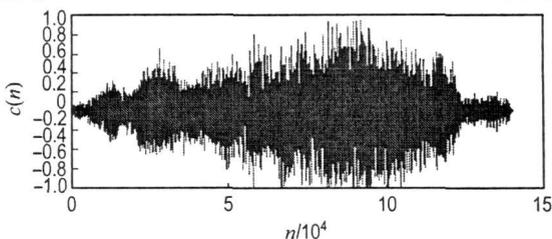
Fig. 5 The waveforms of watermark signal



(a) 密钥正确



(b) 密钥错误



(c) 宿主信号不含水印

图 6 水印信息相关检测波形图

Fig. 6 The waveforms of correlation detection of print information

发生微小误差的情况下,也无法检测出隐秘信号中是否存在水印信息. 图 6(c)示出了音频信号中不含水印信息时的相关检测结果,可以看出,当隐秘信号中不含水印信息时,确实无法检测到水印

的存在.

本文还对掩蔽作用后嵌入水印的隐秘信号进行了各种攻击实验,并与文献 [6] 中未经掩蔽的方法进行了比较,二者相关检测结果示于图 7.

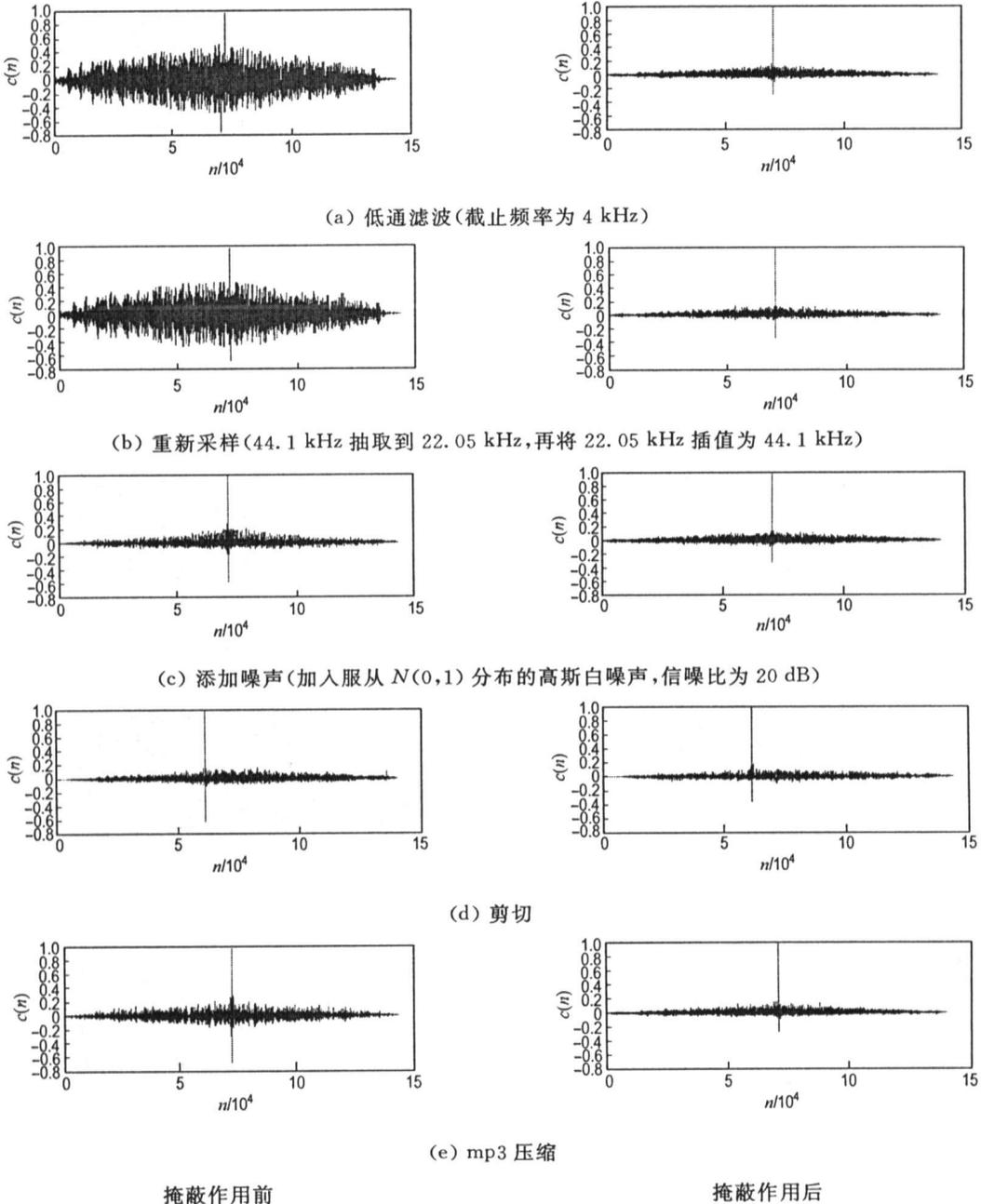


图 7 鲁棒性测试相关检测波形图

Fig. 7 The waveforms of correlation detection for robust test

由图 7可以看出,掩蔽前后,嵌入水印的隐秘信号在遭受各种攻击后,均能有效地检测到水印的存在. 但在低通滤波和重采样两种攻击实验中,掩蔽作用后的相关检测值具有更加明显的二值分布特征,从而验证了引入掩蔽效应的确可以

提高算法的鲁棒性.

4 结 论

本文提出一种基于盲源分离和 HAS掩蔽效应的数字音频水印方法. 在宿主信号未知的情况

下,利用盲源分离技术从含有水印信息的隐秘信号中分离出嵌入的水印信号,实现盲检测的目的;用生成混沌序列的初始值作为水印检测时的密钥信息,确保水印检测的安全性;引入 HAS掩蔽效应的概念,通过时域和频域掩蔽效应,提高算法的鲁棒性.实验结果表明,本文方法在保证不可听性的同时,使得隐秘信号在经过低通滤波、重采样、噪声干扰、剪切和 mp3压缩等信号处理后,水印信息的相关函数较进行时域和频域掩蔽前的具有更加明显的二值分布特征,提高了算法的鲁棒性.同时,本文方法不需要外加同步信息,就可以抵抗剪切攻击.

参考文献:

- [1] GERZON M A, GRAVEN P G. A high-rate buried-data channel for audio CD [J]. *J Audio Eng Soc*, 1995, 43(1-2): 3-22
- [2] KIM H J, CHOI Y H. A novel echo-hiding scheme with backward and forward kernels [J]. *IEEE Trans on Circuits and Syst for Video Technol*, 2003, 13(8): 885-889
- [3] ARNO LD M. Audio watermarking features, applications and algorithms [C] // **IEEE International Conference on Multimedia and Expo**. New York: IEEE Signal Processing Society Press, 2000 1013-1016
- [4] 王秋生, 孙圣和. 一种在数字音频信号中嵌入水印的新算法 [J]. *声学学报*, 2001, 26(5): 464-467
- [5] MALIK H, KHOKHAR S, RASHID A. Robust audio watermarking using frequency selective spread spectrum theory [C] // **The International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing**. Montreal [s n], 2004 385-388
- [6] MA X H, WANG C, CONG X P, *et al*. A digital audio watermarking scheme based on blind source separation [M] // **Advances in Neural Networks**. Heidelberg: LNCS Editorial, 2005 550-555
- [7] 杨行峻, 迟惠生. 语音信号数字处理 [M]. 北京: 电子工业出版社, 1995
- [8] 李伟, 袁一群, 李晓强, 等. 数字音频水印技术综述 [J]. *通信学报*, 2005, 26(2): 100-111
- [9] HYVÄRINEN A, OJA E. A fast fixed-point algorithm for independent component analysis [J]. *Neural Comput*, 1997, 9(7): 1483-1492

A digital audio watermarking scheme based on blind source separation and mask effect of human auditory system

MA Xiao hong^{*}, WANG Chong, YIN Fu liang

(School of Electr. and Inf. Eng., Dalian Univ. of Technol., Dalian 116024, China)

Abstract The blind source separation technology is applied to the digital audio watermarking scheme to extract the embedding watermark signal from the watermarked audio signal in the case of the host signal unknown. By taking the initial value of the chaotic sequence, the mask signals in the time and frequency domains of the host signal as the secret keys to produce the embedding watermark signal, the security in the watermark detection part can be ensured. The embedding watermark signal is adaptive to the host signal by using the mask effect of human auditory system (HAS), which can improve the robustness of the proposed method. Experimental results show that there is no audible distortion between the original audio signal and the watermarked audio signal. And through general signal processing operations such as low-pass filtering, re-sampling, adding noise, cropping and mp3 compression, the correlation value between the embedding watermark signal and the separated watermark signal possesses obvious characteristics of two-value distribution than that without masking operations. In particular, the exact synchronization can be implemented without embedding additional synchronous information into original audio signal.

Key words audio watermarking; blind source separation; independent component analysis; mask effect of human auditory system