

基于提升小波的多重数字音频水印

王让定 徐达文

(宁波大学 纵横智能软件研究所 宁波 315211)

摘要 该文提出了一种在提升小波域同时嵌入鲁棒水印和易损水印的音频水印算法。原始音频信号经过提升小波变换后,将低频小波系数进行均值量化嵌入鲁棒水印,具有较好的鲁棒性和不可感知性;对高频小波系数直接进行单个系数量化嵌入易损水印,当音频内容发生篡改时,这些水印信息会发生相应的改变,从而可以鉴定原始音频的完整性。水印的提取不需要原始音频信号。实验结果表明,鲁棒水印对MP3压缩、低通滤波、加噪、重量化、重采样等信号处理攻击具有很强的鲁棒性;而易损水印对上述攻击则具有很强的敏感性。

关键词 多重音频水印,提升小波变换,盲检,鲁棒水印,易损水印

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)10-1820-07

Multiple Audio Watermarks Based on Lifting Wavelet Transform

Wang Rang-ding Xu Da-wen

(CKC Software Lab, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract An audio watermarking scheme which embedded robust and fragile watermark at the same time in lifting wavelet domain is presented. Robust watermark is embedded in the low frequency range using mean quantization. It has great robustness and imperceptibility. Fragile watermark is embedded in the high frequency range by quantizing single coefficient, when the audio signal is tampered, the watermark information will change synchronously. So it can be used for audio content integrity verification. The watermark can be extracted without the original digital audio signal. Experimental results show that robust watermark is robust to many attacks, such as MP3 compression, low pass filtering, noise addition, requantization, resampling and so on. Fragile watermark is very sensitive to these attacks.

Key words Multiple audio watermarks, Lifting wavelet transform, Blind detection, Robust watermark, Fragile watermark

1 引言

目前,大多数的数字水印算法只具备版权保护或内容认证其中一项功能。但在一些应用领域,可能要用水印实现多个目的,比如为了实现版权保护,需要嵌入鲁棒水印;为了进行内容的完整性认证,需要嵌入易损水印;甚至为了辅助标示多媒体内容信息,还需要嵌入注释水印,因此需要在一份多媒体内容中嵌入多种水印^[1]。

文献[2]在分析混沌序列统计特性的基础上,提出基于混沌序列的多重数字图像水印算法。采用一维混沌映射,根据不同的混沌初始条件可以生成多个互补相关的混沌序列,二值化后截取合适的长度即可得到性能良好的多重数字图像水印信号。采用二维混沌映射将各水印信号随机均匀地叠加在图像小波变换的中低频系数上,各水印信号的嵌入和提取可以互不干扰。文献[3]提出了3类盲水印技术。第1类是单个水印嵌入(Single Watermark Embedding, SWE),使用两个密钥来嵌入一个有意义的二值水印图像标志。在SWE的基础上,提出了第2类水印技术,即多重水印嵌入(Multiple

Watermark Embedding, MWE),在同样的水印空间同时嵌入多重水印,不同的密钥用于不同的水印信息。第3类水印技术称为重复水印嵌入(Iterative Watermark Embedding, IWE),在一个JPEG压缩图像中嵌入单个水印形成另一个JPEG压缩图像。文献[4]提出了一种统计的音频水印算法,在不同的频带同时嵌入多重水印。文献[5]提出基于矢量量化(Vector Quantization, VQ)的数字图像多重水印嵌入方法。文献[6]指出在嵌入多个水印时,除了原始数据对水印的容纳能力的限制外,还存在不同类型水印之间的相互影响的问题,如鲁棒水印的嵌入可能会破坏易损水印。对于同时嵌入鲁棒水印和易损水印,有3种水印嵌入方案可以选择:(1)先嵌入易损水印,然后嵌入鲁棒水印;(2)先嵌入鲁棒水印,然后嵌入易损水印;(3)同时嵌入鲁棒水印和易损水印。其中,方案(1)最不可选,因为易损水印对失真是很敏感的。如果先嵌入易损水印,后嵌入的鲁棒水印会破坏已嵌入的易损水印,使得易损水印失去报告失真(篡改)的作用。方案(2)采用了相反的嵌入策略,由于鲁棒水印对数字作品失真有较强的抵抗能力,所以如果先嵌入鲁棒水印,后嵌入的易损水印虽然对它有一定程度的影响,但不会影响鲁棒水印的提取。方案(3)是两种水印同时嵌入,互不影响。

2005-01-06收到,2005-06-21改回
国家自然科学基金(60572096),浙江省自然科学基金(Y104144)和宁波市博士基金(2005A610003)资助课题

多重水印方案一般要求宿主信号能够隐藏较大的信息量,这就需要更好地利用人的视觉系统(Human Visual System, HVS)和听觉系统(Human Auditory System, HAS)特性,由于人的听觉系统要比视觉系统更加敏感,使得音频多重水印技术更具有挑战性。目前,大多数多重水印技术都是以图像为载体进行嵌入。本文提出一种提升小波域同时嵌入鲁棒水印和易损水印的音频水印算法。原始音频信号经过提升小波变换后,将低频小波系数进行均值量化嵌入鲁棒水印,具有较好的鲁棒性和不可感知性;对高频小波系数直接进行单个系数量化嵌入易损水印,当音频内容发生篡改时,这些水印信息会发生相应的改变,从而可以鉴定原始音频的完整性。与现有的在小波域同时嵌入两种水印的算法^[6]相比,水印系统中的易损水印对MP3 压缩、低通滤波、加噪、重量化、重采样等攻击都具有很强的敏感性,但本文水印系统中鲁棒水印的性能有了较大提高,对上述攻击具有很强的鲁棒性,水印的提取不需要原始音频信号。

2 小波提升

由于传统小波变换是用信号与滤波器卷积的方式进行,计算量大,需要有额外的数据空间存放卷积的结果。为此,本文将引入另外一种小波变换实现算法——“提升(lifting)”算法^[7-9]。提升算法相对于Mallat算法而言,是一种更为快速的小波变换实现方法,它不依赖于傅里叶变换,完全在空域完成了对正交小波滤波器的构造。

文中仅考虑有限长滤波器(FIR) $h = \{h_k\}_{k=k_1}^{k_2}$, 它的 z 变换是一个 Laurent 多项式,满足 $h(z) = \sum_{k=k_1}^{k_2} h_k z^{-k}$ 。在双正交小波变换中,为保证完全重构,分解滤波器 \tilde{h} 和 \tilde{g} , 合成滤波器 h 和 g 必须满足以下条件^[7]:

$$h(z)\tilde{h}(z^{-1}) + g(z)\tilde{g}(z^{-1}) = 2 \tag{1}$$

$$h(z)\tilde{h}(-z^{-1}) + g(z)\tilde{g}(-z^{-1}) = 0 \tag{2}$$

而滤波器 h 的多相表示为

$$h(z) = h_e(z^2) + z^{-1}h_o(z^2) \tag{3}$$

其中 h_e 包含偶数系数, h_o 包含奇数系数:

$$h_e(z) = \sum_k h_{2k} z^{-k}, \quad h_o(z) = \sum_k h_{2k+1} z^{-k}$$

或 $h_e(z^2) = \frac{h(z) + h(-z)}{2}, \quad h_o(z^2) = \frac{h(z) - h(-z)}{2z^{-1}}$

可以用一个多相矩阵^[7]来表示滤波器对 (h, g) :

$$P(z) = \begin{bmatrix} h_e(z) & g_e(z) \\ h_o(z) & g_o(z) \end{bmatrix} \tag{4}$$

提升小波变换分为分裂(split)、预测(predict)和更新(update) 3 个过程。通常是首先采用 Lazy 小波变换,把原始信号分解成偶数序列和奇数序列。

对于原始的滤波器 h 和 g , 经过预测得到一个新的高通滤波器 g^{new} :

$$g^{new} = g(z) + h(z)s(z^2) \tag{5}$$

而对于原始的滤波器 h 和经预测得到的滤波器 g^{new} , 经过更新得到一个新的低通滤波器 h^{new} :

$$h^{new} = h(z) + g(z)t(z^2) \tag{6}$$

其中 $s(z)$ 和 $t(z)$ 均为 Laurent 多项式。显然,根据多相矩阵式(4),式(5)和式(6)可等价地写为下面的矩阵形式:

$$P^{new}(z) = P(z) \begin{bmatrix} 1 & s(z) \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad P^{new}(z) = P(z) \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ t(z) & 1 \end{bmatrix}$$

根据 Euclid 算法,对于一个给定的互补滤波器对 (h, g) , 总是存在 Laurent 多项式 $s_i(z)$ 和 $t_i(z)$ ($1 \leq i \leq m$) 以及一个非零常数 K , 使得

$$P(z) = \prod_{i=1}^m \begin{bmatrix} 1 & s_i(z) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ t_i(z) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K & 0 \\ 0 & 1/K \end{bmatrix} \tag{7}$$

可以看出,所有的有限长滤波小波变换都可以由一个 Lazy 小波变换,并跟随 m 个预测和更新步骤,最后乘以一个因子实现。

本文选取传统的紧支型的小波 db2 (D4), 它的低通滤波器 h 和高通滤波器 g 分别为

$$h(z) = h_0 + h_1 z^{-1} + h_2 z^{-2} + h_3 z^{-3} \tag{8}$$

$$g(z) = -h_3 z^2 + h_2 z - h_1 + h_0 z^{-1} \tag{9}$$

其中 $h_0 = (1 + \sqrt{3}) / (4\sqrt{2})$, $h_1 = (3 + \sqrt{3}) / (4\sqrt{2})$, $h_2 = (3 - \sqrt{3}) / (4\sqrt{2})$, $h_3 = (1 - \sqrt{3}) / (4\sqrt{2})$ 。多相矩阵为

$$P(z) = \tilde{P}(z) = \begin{bmatrix} h_0 + h_2 z^{-1} & -h_3 z - h_1 \\ h_1 + h_3 z^{-1} & h_2 z + h_0 \end{bmatrix} \tag{10}$$

根据 Euclid 算法,分解结果为

$$P(z) = \tilde{P}(z) = \begin{bmatrix} 1 & -\sqrt{3} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{\sqrt{3} + \sqrt{3} - 2}{4} z^{-1} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (\sqrt{3} + 1) / \sqrt{2} & 0 \\ 0 & (\sqrt{3} - 1) / \sqrt{2} \end{bmatrix} \tag{11}$$

3 水印嵌入算法

水印数据为一幅二值图像,对其进行降维、置乱处理,然后用伪随机序列对其进行混沌调制,得到待嵌入水印信号 $w(j), j = 0, \dots, N-1$ 。多重水印的嵌入是通过选择的小波系数进行量化来完成的,水印嵌入过程如下。

(1)小波分解。选择适当的小波基对音频信号进行 $L(L=4)$ 级提升小波分解,得到了 5 个小波系数,其中 A_4 代表音频信号的低频系数, D_4, D_3, D_2, D_1 分别代表音频信号小波分解的各级高频系数。

(2)鲁棒水印的嵌入。音频信号的能量大多集中在低频分量上,稳定性好,抵抗噪声等信号处理的能力较强,是水印嵌入的理想区域。为了保证算法的鲁棒性,选择 A_4 和 D_4 作

为鲁棒水印嵌入区域，其系数记为 $x(i) = \{a_i | a_i \in (A_4, D_4)\}, i = 0, \dots, M-1$ ， M 为子带 A_4 和 D_4 的系数个数，同时采用鲁棒性较强的均值量化^[10-12]方法实施水印嵌入。均值量化方法是基于一个简单但是很有效的原理：考虑一系列样本，样本均值比单个样本具有更小的方差。每个水印比特通过量化的方法嵌入到一系列系数的平均值中，这样，载体信号失真对单个水印位的影响就会大大降低。鲁棒水印嵌入过程如下：

(a) 从 $x(i)$ 中依次选择 n 个系数为一集合，记为 $X(j) = \{x(0+j \cdot n), \dots, x(n-1+j \cdot n)\}, j = 0, \dots, N-1$ 。

(b) 分别计算这些集合中系数的均值 $\bar{X}(j)$ ：

$$\bar{X}(j) = \frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} x(k+j \cdot n) \quad (12)$$

(c) 按照量化的方法，对均值 $\bar{X}(j)$ 进行相应的量化。

令 $z(j) = \lfloor \bar{X}(j)/Q_1 + 0.5 \rfloor$ ， $\lfloor \cdot \rfloor$ 为下取整， Q_1 是预先设定的量化参数，根据量化系数嵌入水印原理，系数量化过程可按下述步骤进行：

如果 $z(j)\%2 = w(j)$ ，则 $\bar{X}^*(j) = z(j) \times Q_1$ ；

如果 $z(j)\%2 \neq w(j)$ ， $z(j) = \lfloor \bar{X}(j)/Q_1 \rfloor$ ，则 $\bar{X}^*(j) = (z(j)+1) \times Q_1$ ；

如果 $z(j)\%2 \neq w(j)$ ， $z(j) = \lfloor \bar{X}(j)/Q_1 \rfloor$ ，则 $\bar{X}^*(j) = (z(j)-1) \times Q_1$ 。

其中 $\%$ 为求余操作， $\bar{X}^*(j)$ 就是相应的量化系数均值。

(d) 设 $\Delta(j)$ 是对均值 $\bar{X}(j)$ 进行量化所产生的误差，对集合中每一个系数也进行相应的修改

$$\begin{aligned} x(k+j \cdot n) &= x(k+j \cdot n) + \Delta(j), \\ k &= 0, \dots, n-1; \quad j = 0, \dots, N-1 \end{aligned} \quad (13)$$

(3) 易损水印的嵌入。选择小波域高频系数 D_1 作为易损水印嵌入区域，其系数记为 $f(m) = \{d_m | d_m \in D_1\}$ 。易损水印的嵌入采用单个系数量化的方法。量化过程与对均值 $\bar{X}(j)$ 量化类似，只需将 $\bar{X}(j)$ 替换为 $f(m)$ ，量化参数 Q_1 替换为 Q_2 。

(4) 对嵌入水印后的音频信号进行小波提升逆变换，得到含水印信息的音频信号。

4 水印提取算法

本文提出的水印嵌入算法使用了量化处理过程，水印的提取不需要原始数字音频信号，是一种公开(盲)水印算法。根据水印嵌入原理和水印数据的编码策略，水印提取和恢复过程如下：

(1) 小波分解。采用与嵌入时相同的小波基对待检测的数字音频信号进行四级提升小波分解，得到不同分辨率级下的细节分量(高频分量) D_{s_l} ($l=1,2,3,4$) 和逼近分量(低频分量) A_{s_4} 。

(2) 鲁棒水印的提取。选择 A_{s_4} ， D_{s_4} 作为鲁棒水印提取区域，其系数记为 $x_s(i) = \{a_i | a_i \in (A_{s_4}, D_{s_4})\}, i = 0, \dots, M-1$ 。

(a) 从 $x_s(i)$ 中依次选择 n 个系数为一集合，记为

$$X_s(j) = \{x_s(0+j \cdot n), \dots, x_s(n-1+j \cdot n)\}, j = 0, \dots, N-1。$$

(b) 分别计算这些集合中系数的均值 $\bar{X}_s(j)$ ：

$$\bar{X}_s(j) = \frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} x_s(k+j \cdot n) \quad (14)$$

(c) 从 $\bar{X}_s(j)$ 中提取水印序列 $\{w_r(j)\}$ ：

$$w_r(j) = \lfloor \bar{X}_s(j)/Q + 1/2 \rfloor \% 2 \quad (15)$$

(d) 水印图像的恢复为编码的逆过程，对提取的水印序列进行解调、去置乱以及升维，得到二值水印图像。

(3) 易损水印的提取。选择 D_{s_1} 作为易损水印提取区域，系数记为 $f_d(m)$ 。

(a) 从 $f_d(m)$ 中提取水印序列 $\{w_d(m)\}$ ：

$$w_d(m) = \lfloor f_d(m)/Q + 1/2 \rfloor \% 2 \quad (16)$$

(b) 易损水印图像的恢复与鲁棒水印类似。

5 实验结果与分析

实验音频样本有：Blues, Classical, Country, Folk, Pop, 样本长度为 30s, 采样率为 44.1kHz, 分辨率为 16bit。重复编码参数 $m=9$ ，嵌入率为 $R_m \approx 1/38$ (每 38 个小波系数嵌入 1bit 水印信息)。采用 Daubechies-2 小波基，用于嵌入一位鲁棒水印的小波系数个数 $n=8$ 。在低频部分作较大量化，针对不同实验音频归一化量化参数 Q_1 的选择如图 1，在高频部分作较小量化，量化参数 Q_2 为相应低频部分量化参数 Q_1 的 1/32。低频部分的较大量化保证鲁棒性，高频部分的较小量化保证易损性。嵌入水印后，所选音频信号的信噪比都超过了 20dB (如图 2)，听觉测试时，人耳并不能察觉嵌入水印前后音频信号的变化。

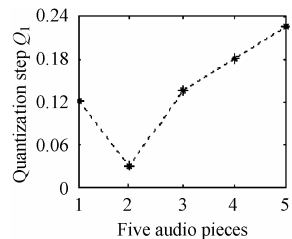


图1 不同音频样本的归一化量化步长

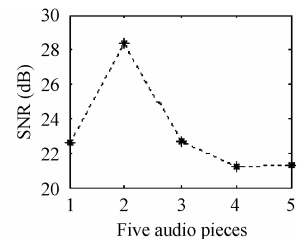


图2 含水印音频信噪比的比较

Fig.1 Quantization steps for different audio pieces

Fig.2 SNR for watermarked audio pieces

嵌入的鲁棒水印和易损水印为同一幅二值图像(80×24)，如图 3(a)，在没有任何攻击情况下，鲁棒水印和易损水印都能完全提取，分别如图 3(b)和图 3(c)。

为了测试鲁棒水印系统的鲁棒性以及易损水印系统的

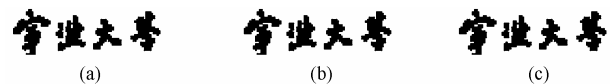


图3 水印信息

(a) 原始水印图像 (b) 提取的鲁棒水印图像

(c) 提取的易损水印图像

Fig.3 Watermark information

(a) Original watermark (b) Extracted robust watermark

(c) Extracted fragile watermark

敏感性，对嵌入了水印的音频信号进行一系列的攻击实

验。并引入了检测性能的位错误率BER(Bit Error Rate), 评价音频感知质量的SNR, 以及评价两个水印模式相似度的归一化相关系数SIM^[13]。

5.1 MP3 压缩攻击

表 1 和表 2 给出了在 128kbps 和 64kbps 压缩率的 MP3 压缩攻击下的测试结果。从表中可以看出在 128kbps 压缩率的 MP3 压缩攻击下, 不同音频段内鲁棒水印信息可以很好的提取出来, 位错误率都在 1% 以内, 归一化相关系数近似为 1。在压缩率较低的 64kbps MP3 压缩攻击下, 鲁棒水印提取的位错误率仍旧很小, 在 5% 以内, 归一化相关系数均超过 0.97, 提取的水印图像与原始水印图像具有很高的相似性。可见该水印系统中鲁棒水印完全能够满足抗 MP3 压缩攻击的要求。但是, 从表中数据可以看出, 易损水印对 128kbps 和 64kbps MP3 压缩攻击不具有抵抗性。将压缩率提高到

320kbps 时, 易损水印信息都不能提取, 与原始水印的相似度很低, 由此可通过比较归一化相关系数很容易对数字音频信号是否发生篡改或破坏做出结论。

5.2 噪声干扰

在嵌有水印的音频信号中加 20dB 的 Gauss 白噪声, 测试结果如表 3 所示, 由表中数据可以看出, 在 20dB 的 Gauss 白噪声攻击下, 鲁棒水印信息仍能够完全提取出来。当噪声逐步增大时, 虽然水印提取将产生一定误码, 但此时加入的噪声已经破坏了原始音频的感知质量, 音频信号失真严重, 对其攻击失去了意义。实验表明, 鲁棒水印在抗击噪声干扰方面具有很强的鲁棒性。同时, 易损水印对噪声干扰具有很强的敏感性, 经过加噪攻击后, 提取的水印信息基本上无法辨别。

表 1 128kbps 码率 MP3 压缩攻击下的测试结果

Tab.1 The experimental results after MP3 compression at 128kbps

		Blues	Classical	Country	Folk	Pop
BER	Robust	0.000000	0.000521	0.000521	0.000000	0.002083
	Fragile	0.344792	0.270313	0.314583	0.418750	0.417187
SIM	Robust	1.000000	0.999611	0.999611	1.000000	0.998445
	Fragile	0.722824	0.786800	0.749665	0.654414	0.653356
水印	Robust					
	Fragile					

表 2 64kbps 码率 MP3 压缩攻击下的测试结果

Tab.2 The experimental results after MP3 compression at 64kbps

		Blues	Classical	Country	Folk	Pop
BER	Robust	0.035937	0.000521	0.026562	0.013542	0.006250
	Fragile	0.494792	0.405729	0.486979	0.500000	0.499479
SIM	Robust	0.973053	0.999611	0.980018	0.989867	0.995332
	Fragile	0.581528	0.668572	0.591027	0.582042	0.577896
水印	Robust					
	Fragile					

表 3 20dB 高斯白噪声攻击下的测试结果

Tab.3 The experimental results after 20dB noise addition attack

		Blues	Classical	Country	Folk	Pop
BER	Robust	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
	Fragile	0.485417	0.490625	0.489583	0.501563	0.504687
SIM	Robust	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000
	Fragile	0.588548	0.585439	0.582331	0.573406	0.571870

水印	Robust					
	Fragile					

5.3 重采样

表 4 给出了重采样频率为原来 1/2 时的测试结果，亦即将嵌有水印的音频信号由 44.1kHz 下采样到 22.05kHz，再上采样到 44.1kHz。由表中数据可以看出，经重采样攻击后，鲁棒水印信息提取的位错误率很小，在 2% 以内，归一化相关系数近似为 1，提取的水印图像与原始水印图像具有很强的相似性。当重采样频率降低为原来的 1/4 时，亦即将嵌有水印的音频信号由 44.1kHz 下采样到 11.025kHz，再上采样到 44.1kHz，水印信息仍可以提取出来，但此时已经引入了噪声。可见，鲁棒水印对重采样攻击的抵抗能力很强。同时，由表中数据也可看出，经过重采样攻击后，提取的易损水印信息基本上无法辨别。将下采样频率提高到 32kHz 时，提取

的易损水印仍然无法识别，可见，易损水印对重采样攻击具有很强的敏感性。

5.4 重量化

对嵌有水印的音频信号进行重量化攻击，将音频信号由 16bit 量化为 8bit，再量化为 16bit。鲁棒水印都可以完全提取出来，结果如表 5 所示，鲁棒水印对重量化攻击具有很强的鲁棒性。提取的易损水印基本上无法辨别，易损水印对重量化攻击具有很强的敏感性。

5.5 低通滤波

采用长度为 6 阶，截止频率为 11025Hz 的巴特沃思低通数字滤波器，实验结果如表 6。从表中数据可以看出，经 11025Hz 低通滤波攻击后，水印信息提取的位错误率都在

表 4 重采样攻击下测试结果

Tab.4 The experimental results after resampling attack

		Blues	Classical	Country	Folk	Pop
BER	Robust	0.006250	0.013021	0.000521	0.000000	0.001042
	Fragile	0.497917	0.475000	0.484896	0.497917	0.500521
SIM	Robust	0.995335	0.990270	0.999612	1.000000	0.999223
	Fragile	0.584411	0.605051	0.597073	0.578811	0.576398
水印	Robust					
	Fragile					

表 5 重量化攻击下测试结果

Tab.5 The experimental results after requantization attack

		Blues	Classical	Country	Folk	Pop
BER	Robust	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
	Fragile	0.483854	0.489583	0.503646	0.370833	0.201042
SIM	Robust	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000
	Fragile	0.597108	0.587780	0.576078	0.698648	0.844186
水印	Robust					
	Fragile					

表 6 低通滤波攻击下测试结果
Tab.6 The experimental results after low-pass filtering attack

		Blues	Classical	Country	Folk	Pop
BER	Robust	0.003125	0.009375	0.000521	0.000000	0.001042
	Fragile	0.500000	0.483854	0.495833	0.491146	0.514062
SIM	Robust	0.997667	0.992993	0.999612	1.000000	0.999223
	Fragile	0.579075	0.593718	0.582379	0.583689	0.568327
水印	Robust					
	Fragile					

1%以内, 归一化相关系数近似为 1, 提取的水印图像失真较小。当截止频率逐步降低时, 对音频信号的损失程度会逐步加大, 水印提取的误码率也会相应增大。当截止频率大于 12kHz 时水印信息都可以完全提取出来, 位错误率为 0, 归一化相关系数为 1。截止频率为 8kHz 时, 水印信息提取的位错误率都在 15%左右, 提取的水印图像与原始水印图像具有很高的相似性。通过听力测试, 当截止频率低于 8kHz 时, 音频信号中明显引入了噪声, 可见截止频率低于 8kHz 的低通滤波攻击破坏了原始音频的使用价值, 攻击失去了意义。实验表明, 水印系统在抗击低通滤波攻击方面具有很强的鲁棒性。但是, 从表中数据也可看出, 当截止频率为 11025Hz 时, 提取的易损水印信息基本上无法辨别。当截止频率提高到 21kHz 时, 提取的易损水印信息仍然无法辨别。可见, 易损水印对重采样攻击具有很强的敏感性。

实验结果表明, 本文提出的多水印系统中鲁棒水印对 MP3 压缩、低通滤波、加噪、重量化、重采样等攻击都具有很好的鲁棒性, 能够很好地抵御常见的攻击, 而其中的易损水印对上述攻击都具有很强的敏感性, 通过比较提取水印和原始水印的归一化相关系数, 可以很容易对音频信号的原始性作出结论。

6 性能比较

本文提出的提升小波域同时嵌入鲁棒水印和易损水印的算法, 与现有的在小波域同时嵌入两种水印的算法^[6]相比, 水印系统中的易损水印对 MP3 压缩、低通滤波、加噪、重量化、重采样等攻击都具有很强的敏感性, 但鲁棒水印的性能有了较大提高。文献[6]中鲁棒水印的嵌入采用的是对单个小波系数进行量化嵌入水印, 本文中鲁棒水印的嵌入采用了均值量化技术, 每个水印比特位通过量化的方法嵌入到一系列小波系数的平均值中, 通过量化系数个数和量化参数控制水印系统的鲁棒性。根据统计知识, 对一系列样本, 其总体均值比单个样本具有更小的方差, 对均值的修改更难超过给定的量化间隔。因此, 通过修改一系列小波系数的均值嵌入

水印比修改单个系数嵌入水印鲁棒性更强。

为了更客观地比较两种水印系统中鲁棒水印的性能, 进行了测试比较。实验结果表明, 两种水印系统中鲁棒水印对 MP3 压缩攻击、噪声干扰、重量化攻击的鲁棒性很强, 经过上述攻击, 鲁棒水印基本上都能很好地恢复出来, 系统性能相差不大。但是对于重采样攻击和低通滤波攻击, 鲁棒水印性能相差明显。文献[6]中鲁棒水印经过重采样攻击和低通滤波攻击后, 有的音频样本中水印信息提取的位错误率很高, 提取的水印图像几乎不能辨认; 但是本文水印系统中鲁棒水印经过重采样攻击和低通滤波攻击后, 水印信息提取的位错误率都很小, 归一化相关系数近似为 1, 提取的水印图像基本上没有什么失真。

图 4 和图 5 分别给出文献[6]和本文水印系统中鲁棒水印经过重采样攻击和低通滤波攻击后, 水印提取的位错误率和归一化相关系数比较结果。由实验结果可知, 在抵抗重采样攻击和低通滤波攻击方面, 本文水印系统中鲁棒水印的鲁棒性得到了明显的增强。

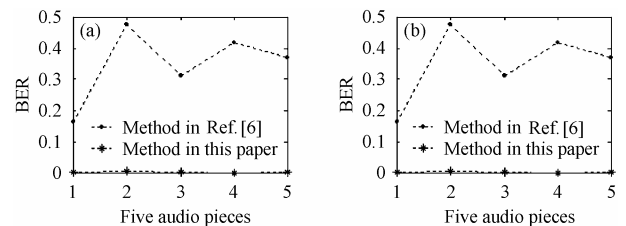


图 4 水印提取位错误率比较
(a)重采样攻击 (b)低通滤波攻击

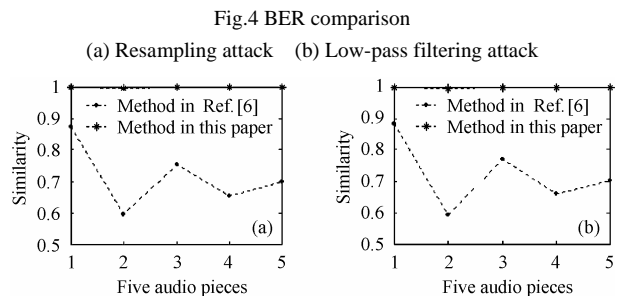


Fig.4 BER comparison
(a) Resampling attack (b) Low-pass filtering attack

图5 水印提取归一化相关系数比较

(a) 重采样攻击 (b) 低通滤波攻击

Fig.5 Sim comparison

(a) Resampling attack (b) Low-pass filtering attack

7 结束语

本文提出了一种提升小波域同时嵌入鲁棒水印和易损水印的算法。原始音频信号经过提升小波变换后,将低频小波系数进行均值量化嵌入鲁棒水印,具有较好的鲁棒性和不可感知性;对高频小波系数直接进行单个系数量化嵌入易损水印,当音频内容发生篡改时,这些水印信息会发生相应的改变,从而可以鉴定原始音频的完整性。实验结果表明,与现有的在小波域同时嵌入两种水印的算法相比,水印系统中的易损水印对MP3压缩、低通滤波、加噪、重量化、重采样等攻击都具有很强的敏感性,通过比较提取的水印和原始水印的归一化相关系数,可以很容易对音频信号的完整性做出判断;但本文水印系统中鲁棒水印的性能有了较大提高,对上述攻击具有很强的鲁棒性。除了在低频小波系数嵌入鲁棒水印和高频小波系数嵌入易损水印外,还可以在小波系数的中间频带嵌入其它水印信息,该水印算法支持多重水印嵌入。

参 考 文 献

- [1] Mintzer F, Braudaway G W. If one watermark is good, are more better? Proceeding of 1999 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP'99), Phoenix, Arizona, March 1999, 4: 2067-2069.
- [2] 纪震, 肖薇薇, 王建华, 张基宏. 基于混沌序列的多重数字图像水印算法. 计算机学报, 2003, 26(11): 1555-1561.
- [3] Wong P H W, Au O C, Yeung Y M. A novel blind multiple watermarking technique for images. *IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology*, 2003, 13(8): 813-830.
- [4] Arnold M, Huang Z W. Blind detection of multiple audio watermarks. Proceedings of First International Conference on Web Delivering of Music, Florence, Italy, 2001: 4-11.
- [5] Pan J S, Huang H C, Wang F H. A VQ-based robust multi-watermarking algorithm. Proceedings of IEEE Region 10 International Conference on Computers, Communications, Control and Power Engineering, Beijing, Oct. 2002, 1: 117-120.
- [6] 华先胜, 石青云. 多类水印的同时嵌入. 北京大学学报(自然科学版), 2001, 37(3): 305-314.
- [7] Daubechies I, Sweldens W. Factoring wavelet transforms into lifting steps. *Journal of Fourier Analysis and Applications*, 1998, 4(3): 245-267.
- [8] Sweldens W. The lifting scheme: A custom-design construction of biorthogonal wavelets. *Journal of Applied Computing and Harmonic Analysis*, 1996, 3(2): 186-200.
- [9] Sweldens W, Schroder P. Building your own wavelets at home. *Wavelets in Computer Graphics*, ACM SIGGRAPH Course Notes, 1996: 15-87.
- [10] Yu G J, Lu C S, Liao H Y M. Mean quantization-based fragile watermarking for image authentication. *Optical Engineering*, 2001, 40(7): 1396-1408.
- [11] Yu G J, Lu C S, Liao H Y M, Sheu J P. Mean quantization blind watermarking for image authentication. Proceedings of 2000 International Conference on Image Processing, Vancouver, BC, Canada, *IEEE Computer Society*, 2000, 3(3): 706-709.
- [12] Chen L H, Lin J J. Mean quantization based image watermarking. *Image and Vision Computing*, 2003, 21(8): 717-727.
- [13] Wang R D, Xu D W, Chen J E, Du C T. Digital audio watermarking algorithm based on linear predictive coding in wavelet domain. 2004 7th International Conference on Signal Processing (ICSP'04), Beijing, China, 2004, 3: 2393-2396.

王让定: 男, 1962年生, 教授, 博士, 主要研究方向为数字水印、语音识别、语音编码、计算机应用。

徐达文: 男, 1981年生, 硕士生, 研究方向为语音信号处理、数字水印技术。