doi:10.11830/ISSN.1000-5013.201606022

离散小波变换与奇异值分解的音频信号水印算法

冯小明[1]，冯乃光[2]，汪云云[1]

(1. 南京邮电大学 工程训练中心，江苏 南京 210003；
2. 四川广播电视大学 工程技术学院，四川 成都 610072)

摘要： 针对现有水印算法在嵌入过程中通常会对原始音频信号产生破坏的问题，设计了一种基于离散小波变换-奇异值分解(DWT-SVD)的水印嵌入方法实现水印信号的嵌入与提取. 同时，以相关系数和误码率为衡量指标，对水印算法的不可感知性、安全性及鲁棒性进行评定测试. 结果表明：在经过噪声、滤波、剪切、压缩等多种攻击后，所提取的水印仍然能保持较高的清晰度，这说明 DWT-SVD 算法具有较强的抗攻击能力，可有效保护版权人的利益.

关键词： 小波变换；水印算法；音频信号；奇异值分解

中图分类号： TP 751.1　　**文献标志码：** A　　**文章编号：** 1000-5013(2016)06-0770-04

Watermarking Algorithm of Audio Signal Based on Discrete Wavelet Transform and Singular Value Decomposition

FENG Xiaoming[1], FENG Naiguang[2], WANG Yunyun[1]

(1. Engineering Training Center, Nangjing University of Posts and Telecommunications, Nangjing 210003, China;
2. College of Engineering and Technology, Sichuan Radio and Television University, Chengdu 610073, China)

Abstract: The existing watermarking algorithm in the embedding process usually issues the destruction of the original audio signal, and design a watermark embedding method based on the discrete wavelet transform-singular value decomposition (DWT-SVD) to realize the watermark embedding and extraction. At the same time, with the correlation coefficient and bit error rate as the measuring index, the non-sense, security and robustness of the watermarking algorithm are evaluated and tested. Results show that after noise, filtering, cropping, compression multiple attacking, the extracted watermark can still maintain a high clarity, which indicates that DWT-SVD algorithm has strong anti-attack ability, can effectively protect the copyright owner's interests.

Keywords: wavelet transform; watermarking algorithm; audio signal; singular value decomposition

在原始音频信号中嵌入水印是一种有效的产品版权保护手段，但在水印嵌入过程中，往往会使原始音频信号发生改变，使数字水印所具有的鲁棒性受到破坏. 基于此，寻找一种有效的音频水印嵌入方法成为学者们研究的重点. 不可感知性和鲁棒性是衡量水印算法有效性的根本指标[1]，按照对音频信号的处理方式，水印嵌入算法可分为时域法和变换域法[2]. 时域法是不经过频域变换，直接把水印嵌入到原始音频上，嵌入和提取过程较快，缺点是水印比较脆弱，抗攻击能力较弱[3]，如信息隐藏(LSB)算法、回

收稿日期： 2016-10-13

通信作者： 冯小明(1960-)，女，高级工程师，主要从事计算机技术的研究. E-mail:671003753@qq.com.

基金项目： 国家自然科学基金青年基金资助项目(61300165)

声隐藏算法等[4]. 变换域法是先将采样数据变换为另一个域内的数字信号，在加入水印后再逆变为原来域中的数字信号，该方法具有透明性好、鲁棒性强等特点，如离散小波变换、傅里叶变换、倒谱变换等[5-7]. 在小波变换基础上，以提高水印鲁棒性为目标，设计一种基于 DWT-SVD 的组合音频水印算法.

1　基于 DWT-SVD 的零水印算法

1.1　水印图像预处理

设原始水印是一个二值图像，可以表示为

$$W = \{\boldsymbol{\omega}(i,j), 0 \leqslant i \leqslant m_1, 0 \leqslant j \leqslant m_2, \boldsymbol{\omega}(i,j) \in [0,1]\}. \tag{1}$$

式(1)中：m_1 为二值图像的宽度；m_2 为二值图像的高度. 因此，音频信号为一维信号，为将水印信号嵌入音频信号中，对二值图像进行降维处理，可得到二值序列，即

$$V = \{v(k) = \boldsymbol{\omega}(i,j), 0 \leqslant i \leqslant m_1, 0 \leqslant j \leqslant m_2, k = i \times m_2 + j\}. \tag{2}$$

Logistic 混沌序列具有较好的互相关性和自相关性，用其进行水印图像的加密可保证水印具有较好的保密性，进行二值化处理后，可得

$$S = \{s(l), 1 \leqslant l \leqslant m_1 \times m_2, s(l) \in [0,1]\}. \tag{3}$$

由此得到置乱后的水印图像为

$$W' = V \oplus S. \tag{4}$$

1.2　水印的嵌入过程

1）将原始音频信号分段，分成 $m_1 \times m_2$ 个帧，每帧的长度为 1 024 样点. 2）将三级小波变换得到的低频分量 ca3 进行降维，得到一维矩阵 $\boldsymbol{A}_0$. 3）将置乱后的水印和矩阵 $\boldsymbol{A}_0$ 分成 16×16 大小的块. 4）将每个小块进行奇异值分解，得到奇异值矩阵 $\boldsymbol{S}_{i,j}$ 和 $\boldsymbol{S\omega}_{i,j}$. 5）将 $\boldsymbol{S\omega}_{i,j}$ 嵌入矩阵 $\boldsymbol{S}_{i,j}$ 中，完成水印信息的嵌入，$\boldsymbol{Sa}_{i,j} = \boldsymbol{S}_{i,j} + \alpha \times \boldsymbol{S\omega}_{i,j}$. 式中：$\alpha$ 为嵌入强度，且 $0 < \alpha < 1$. 6）将嵌入水印的矩阵进行 SVD 变换，分解为含有水印的小块 $\boldsymbol{Aa}_{i,j}$. 7）将含有水印的小块进行整合，将得到的矩阵进行逆变换，最后得到含有水印的音频信号，从而完成音频水印的嵌入. 水印嵌入流程，如图 1 所示.

1.3　水印的提取过程

水印提取过程即嵌入水印的逆过程. 1）将嵌入水印信号的音频进行三级小波变换. 2）低频分量 ca3 升维，得到二维矩阵 $\boldsymbol{A}_1$. 3）将矩阵 $\boldsymbol{A}_1$ 分成 16×16 大小的块，每个小块中都含有水印信号. 4）将音频块奇异值分解，得到矩阵 $\boldsymbol{Sa}_{i,j}$，$\boldsymbol{Ua}_{i,j}$ 和 $\boldsymbol{Va}_{i,j}$. 5）为得到嵌入水印奇异值矩阵，对水印嵌入公式进行逆运算，$\boldsymbol{S\omega}_{i,j} = (\boldsymbol{Sa}_{i,j} - \boldsymbol{S}_{i,j})/\alpha$. 6）将含水印的奇异值矩阵反变换，得到水印小块 $\boldsymbol{A\omega}_{i,j}$. 7）将每个小块整合为 16×16 的矩阵，实现水印的提取过程. 水印提取流程，如图 2 所示.

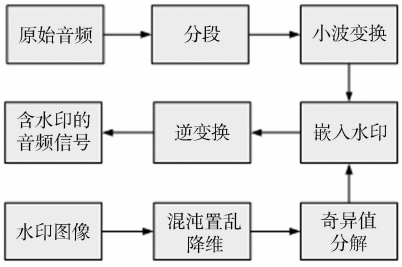


图 1　音频水印信号的嵌入流程

Fig. 1　Embedding process of audio watermark signal

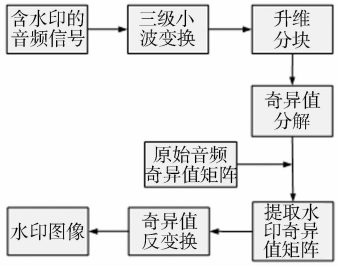


图 2　音频水印信号的提取流程

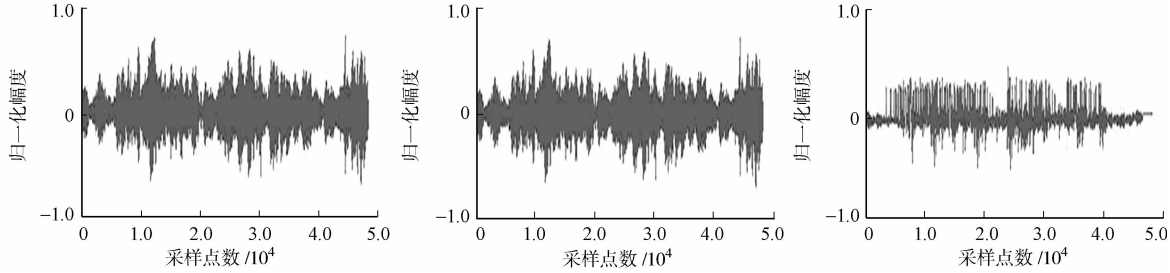
Fig. 2　Extraction process of audio watermark signal

2　仿真实验与结果分析

2.1　不可感知性测试

为了测试嵌入水印对原始音频信号的影响，采用 Matlab 分析软件进行听觉感知仿真，选用单声道、16 bit 原始音频文件，采样频率为 44.1 kHz，音频格式为 WAV. 水印图像采用 16 px×16 px 的二值图像. 采用 Logistic 混沌序列加密，嵌入强度 α 为 0.2，根据原始音频和水印信息的长度进行采样分帧，仿

真结果,如图 3 所示. 由图 3 可知:原始音频信号在水印图像嵌入的前后,音频信号的波形幅度没有发生明显的变化. 经计算嵌入水印前后音频信号信噪比为 35.036 7 dB. 该数值在听觉上很难感觉到音频水印的存在,说明水印算法具有较好的不可感知性.



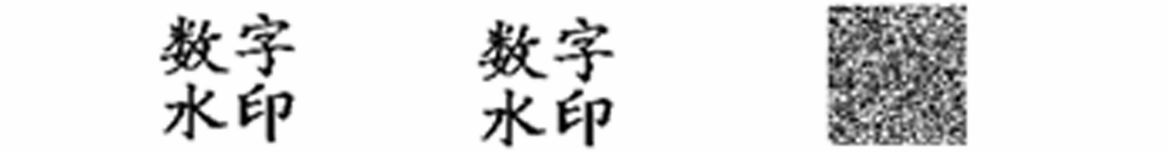
(a) 嵌入水印前的音频信号 (b) 嵌入水印后的音频信号 (c) 嵌入水印前后的波形差

图 3 水印嵌入前后音频信号波形对比

Fig. 3 Comparison of audio signal waveform before and after watermark embedding

2.2 安全性测试

为检验 Logistic 混沌序列加密的可靠性与安全性,对嵌入的水印信号进行保密性测试,分别采用正确的和错误的密钥对水印图像进行提取,分别与原始水印图像对比,其结果如图 4 所示. 由图 4 可知:当采用正确密钥提取水印时,得到的水印图像非常清晰,与原始水印相比,基本没有发生任何改变. 由此可见,采用 Logistic 混沌序列对音频水印信号进行加密和置乱具有较好的安全性,满足保密性要求.



(a) 原始水印 (b) 正确密匙下提取的水印 (c) 错误密匙下提取的水印

图 4 水印图像的安全性测试

Fig. 4 Security testing of watermark image

2.3 鲁棒性测试

为了测试算法鲁棒性,分别对嵌入水印的古典音乐和摇滚音乐信号进行攻击实验,具体攻击内容如下. 1) 高斯噪声. 在待测试的音频信号中加入均值为 0 的正态分布高斯噪声. 2) 重采样. 改变待测试音频的采样频率,由 44.1 kHz 变为 22.05 kHz. 3) 低通滤波. 采用 2 阶低通滤波器对待测试音频进行滤波,滤波器的截止频率为 4 Hz. 4) 重量化. 先将待测试音频从 16 bit 量化为 8 bit,再量化为 16 bit. 5) 剪切. 将待测试音频随机裁剪掉 2 s. 6) 小波去噪. 利用一维小波分析方法对信号进行降噪处理. 7) MP3 压缩. 将待测试音频压缩到 56 Kb · s^{-1}. 攻击完成后,对水印图像进行提取,为进一步分析水印的清晰程度,分别采用相关系数和误码率作为评价指标对其进行判定,相关系数为

$$\mathrm{NC}(\boldsymbol{\omega},\hat{\boldsymbol{\omega}}) = \frac{\sum_{i=1}^{N_1}\sum_{j=1}^{N_2}\boldsymbol{\omega}(i,j)\cdot\hat{\boldsymbol{\omega}}(i,j)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N_1}\sum_{j=1}^{N_2}\boldsymbol{\omega}(i,j)^2\sum_{i=1}^{N_1}\sum_{j=1}^{N_2}\hat{\boldsymbol{\omega}}(i,j)^2}}. \tag{5}$$

式(5)中:N_1,N_2 分别为信号长度;$\boldsymbol{\omega}(i,j)$为原始水印信号;$\hat{\boldsymbol{\omega}}(i,j)$为提取的水印信号.

误码率 R_{BE}是检验音频水印信号抗攻击能力的另一个指标,其表达式为

$$R_{\mathrm{BE}} = \frac{E_{\mathrm{bit}}}{T_{\mathrm{bit}}}\times 100\%. \tag{6}$$

式(6)中:E_{bit}为错误的比特数量;T_{bit}为总的比特数量.

受到攻击后提取的水印图像及其属性值,如表 1 所示. 由表 1 可知:受到攻击后的音频信号提取出来的水印图像大多清晰可见,基本不受各攻击操作的影响,只有 MP3 压缩水印效果稍显模糊,但水印图像的内容仍然可以很容易分辨出来,这说明所采用的水印算法抗攻击能力强、可行有效.

为了进一步验证 DWT-SVD 算法的有效性，与单纯采用小波变换作为水印嵌入算法进行鲁棒性对比测试，测试过程中，选取相同的古典音乐作为原始音频信号，采用同一格式的图像作为水印. 水印嵌入后，分别对两个含水印的音频信号进行鲁棒性测试，并采取相关系数及误码率进行评定，结果如表 2 所示. 由表 2 可知：与只采用小波变换水印算法相比，采用小波变换与奇异值分解相结合的水印算法各项性能都大幅提升，对各种攻击的抵抗能力更强.

表 1　受到攻击后提取的水印图像及其属性值

Tab. 1　Extracted watermark image and its attribute value after attack

攻击类型	古典音乐		摇滚音乐	
	相关系数	误码率	相关系数	误码率
无攻击	1.000 0	0	1.000 00	0
高斯噪声	0.993 6	0.007 2	0.998 10	0.002 8
低通滤波	0.992 5	0.008 9	0.989 30	0.017 3
重量化	0.990 4	0.013 9	0.998 60	0.002 1
采重样	1.000 0	0	0.997 90	0.003 2
剪切	0.993 0	0.009 2	0.990 76	0.003 3
小波去噪	0.997 0	0.003 5	1.000 00	0
MP3 压缩	0.902 3	0.103 8	0.832 90	0.206 2

表 2　鲁棒性测试结果

Tab. 2　Robustness test results

测试参数	算法	高斯噪声	低通滤波	质量化	采重样	剪切	小波去噪	MP3 压缩
NC	DWT+SVD	0.998 1	0.989 3	0.998 6	0.997 9	0.997 6	1.000 0	0.832 9
	DWT	0.851 3	0.785 7	0.902 5	0.891 1	0.883 5	0.912 5	0.822 4
R_{BE}	DWT+SVD	0.002 8	0.017 3	0.002 1	0.003 2	0.003 3	0	0.206 2
	DWT	0.010 2	0.019 6	0.009 7	0.010 3	0.010 5	0.019 6	0.022 8

3　结束语

针对嵌入过程容易造成原始信号损坏的问题，提出一种 DWT-SVD 组合音频水印算法. 该方法结合了小波变换多分辨率与奇异值分解抗干扰能力强的特点，嵌入过程不改变原始水印信息，同时基于 Logistic 混沌序列对二值水印信息进行加密，以满足水印的安全性要求. 测试结果表明，DWT-SVD 水印算法可大幅提高水印的相关系数，有效降低水印信息的误码率，对数字音频产品的版权具有一定的保护作用.

参考文献：

[1]　杨榆，雷敏，钮心忻，等. DWT-DCT-QR 结合的音频盲水印算法[J]. 重庆大学学报，2012，35(8)：62-66.

[2]　吴倪. 基于 DCT 域的数字水印算法及其在版权保护中的应用[D]. 长沙：中南大学，2013：12-15.

[3]　雷敏. 音频数字水印与隐写分析算法研究[D]. 北京：北京邮电大学，2011：23-27.

[4]　林晓丹. 一种基于支持向量机的数字音频认证方法[J]. 华侨大学学报(自然科学版)，2011，32(3)：153-155.

[5]　于晓敏，于晓坤，耿蕊. 基于离散小波变换的盲水印研究与仿真[J]. 计算机仿真，2011，28(8)：287-290.

[6]　刘素楠，方志宏，李淑芝. 采用混沌加密和重复码的复倒谱音频水印算法[J]. 计算机工程与应用，2010，46(4)：79-82.

[7]　董斌. 基于变换域的音频水印研究及实现[D]. 长春：吉林大学，2011：17-21.

[8]　全笑梅，张鸿宾. 基于小波包域听觉感知分析的统计音频水印算法[J]. 电子学报，2007，35(4)：673-678.

[9]　彭维，高健，孙瑞鹏，等. 基于 DCT 系数比较的音频水印算法[J]. 计算机应用与软件，2014，31(11)：158-160.

[10]　冯祥斌，陈永红. 应用 P-Fibonacci 加密的模糊自适应水印算法[J]. 华侨大学学报(自然科学版)，2014，35(5)：227-292.

（**责任编辑：**钱筠　　**英文审校：**吴逢铁）