

## 基于盲源分离的小波域多重音频水印方法

马晓红 孙长富

(大连理工大学电子与信息工程学院 大连 116023)

**摘要:** 该文利用盲源分离理论, 提出一种小波域的多重音频水印方法。为了解决多水印嵌入过程中经常需要考虑的嵌入顺序问题, 同时增强水印方法的安全性, 本文将两路水印信号与一路等长的混沌序列进行混合, 得到嵌入水印信号。然后, 利用线性混合方法, 将嵌入水印信号与选定的小波系数进行混合, 得到隐秘信号。水印提取时, 利用独立分量分析算法, 提取嵌入水印信号, 再经过后处理过程, 得到原始水印。该水印方案是一种盲水印方法, 可以将多个作者信息同时嵌入到音频作品中, 而不需要考虑水印的嵌入顺序。实验结果表明, 该方法对常规的信号处理操作具有良好的鲁棒性, 以及良好的抵抗时间轴同步攻击的能力。

**关键词:** 多重水印; 嵌入水印; 小波变换; 盲源分离; 独立分量分析

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)10-2307-04

## A DWT Domain Multiple Watermarking Scheme Based on Blind Source Separation

Ma Xiao-hong Sun Chang-fu

(School of Electronic and Information Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

**Abstract:** A DWT domain multiple watermarking scheme based on blind source separation is proposed in this paper. In consideration of the embedding order and safety, two original watermarks are mixed with a chaotic sequence to generate an embedding watermark signal. Then the host audio signal is transformed into wavelet domain to obtain the low frequency coefficients and the embedding watermark is embedded in with the linear mixing model. In the extraction procedure, the FastICA is applied to obtain the embedding watermark signal and the original watermark signals. The scheme is a blind watermarking method and need not consider the embedding order. The experimental results show that the method proposed in this paper is robust against most common signal processing and the time-scale modification.

**Key words:** Multiple watermarking; Embedding watermark; Discrete Wavelet Transform(DWT); Blind Source Separation(BSS); Independent Component Analysis(ICA)

### 1 引言

随着计算机网络的迅速发展和广泛应用, 以 mp3 为代表的音乐制品变得更易传播, 从而促进了信息的共享, 并进一步推动了数字音乐作品的发展。但同时也带来了新的问题: 出于商业目的, 盗版者利用方便快捷的网络, 肆意下载各种音乐作品制作成 CD 光盘等进行销售, 获取暴利。目前, 还没有一种有效的机制来制止这种非法的行为。数字音频水印技术的发展提供了解决这一问题的新思路。通过将代表作者信息的图像、签名或者是作品的序列号等信息嵌入到音乐制品中, 达到了版权保护的目的<sup>[1-4]</sup>。

一部优秀的音乐作品往往是由一个团队的成员共同参与完成的, 每个人在作品的制作过程中都做出了贡献。此时, 采用多水印方法<sup>[5-7]</sup>, 即将每个作者的信息分别都嵌入到音频作品中, 可以实现这种多著作权的保护问题。但是, 多数

的多水印方法往往需要考虑水印的嵌入顺序, 针对这一问题, 本文提出一种基于盲源分离的小波域多重音频水印方法。

首先, 对两幅原始二值水印图像进行置乱和降维处理, 得到两个一维信号, 利用一个混沌序列对这两路信号进行加密, 生成一路嵌入水印信号, 以解决多水印嵌入过程中经常需要考虑的嵌入顺序问题; 然后, 将宿主音频信号进行小波分解并分段, 在每一段小波系数的逼近分量中嵌入同步码, 并选定系数与嵌入水印信号进行混合, 得到隐秘信号。

水印提取是嵌入的逆过程。利用独立分量分析算法<sup>[8]</sup>以及保留的密钥, 可以提取出嵌入水印信号, 再通过后处理过程, 获得两幅二值水印图像。实验结果表明, 该方法简单有效, 对常规的信号处理操作具有良好的鲁棒性以及良好的抵抗时间轴同步攻击的能力。

### 2 盲源分离简介

盲源分离用于解决在源向量和混合矩阵均为未知的情况下, 从观测向量中恢复出每个相互独立的源向量的问题。

2007-03-19 收到, 2007-08-06 改回

国家自然科学基金(60575011)和辽宁省自然科学基金(20052181)资助课题

假设有  $N$  个独立的源信号  $s_1, s_2, \dots, s_N$  和  $M$  个由这些源信号混合而成的观测信号  $x_1, x_2, \dots, x_M$  ( $M \geq N$ )。盲源分离瞬时混合模型可以由下式表示

$$\mathbf{x} = \mathbf{A}\mathbf{s} \quad (1)$$

其中  $\mathbf{s} = [s_1, s_2, \dots, s_N]^T$  为源信号向量,  $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_M]^T$  表示观测信号向量,  $\mathbf{A}$  为混合矩阵。盲源分离的目的就是寻找一个分离矩阵  $\mathbf{V}$ , 使得

$$\hat{\mathbf{s}} = \mathbf{V}\mathbf{x} = \mathbf{V}\mathbf{A}\mathbf{s} = \mathbf{C}\mathbf{s} \quad (2)$$

其中  $\hat{\mathbf{s}}$  是源信号向量的估计或拷贝<sup>[9]</sup>。

### 3 水印信号的生成和嵌入

#### 3.1 水印信号的生成

水印信号生成与嵌入原理框图如图1所示。

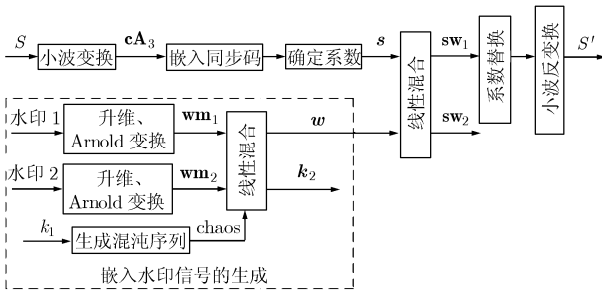


图1 水印信号生成与嵌入原理框图

选择两幅大小相等的二值图像作为原始水印图像。首先, 分别对两个水印图像做 Arnold 变换<sup>[10]</sup>将其置乱, 然后将二者降维, 生成两路一维信号。为了解决多水印嵌入过程中经常需要考虑的嵌入顺序问题, 同时增强水印方法的安全性, 利用线性混合的方法, 将一路等长的混沌序列<sup>[11]</sup>和这两路水印信号进行混合, 获得两路信号, 一路作为嵌入水印信号  $w$ , 另一路作为密钥  $k_2$  保留。混沌序列的初始值和迭代系数  $\mu$  作为密钥  $k_1$  保留。混沌序列和两路水印信号的混合过程如式(3)所示:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} w \\ k_2 \end{bmatrix} = \mathbf{A}_1 \mathbf{S} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{wm}_1 \\ \mathbf{wm}_2 \\ \text{chaos} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11}\mathbf{wm}_1 + a_{12}\mathbf{wm}_2 + a_{13}\text{chaos} \\ a_{21}\mathbf{wm}_1 + a_{22}\mathbf{wm}_2 + a_{23}\text{chaos} \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中  $\mathbf{A}_1$  为一个秩为 2 的矩阵。为了保证鲁棒性,  $\mathbf{A}_1$  中的元素需要满足  $a_{11}, a_{12} \gg a_{13}$ ,  $a_{21}, a_{22} \gg a_{23}$ 。

#### 3.2 水印信号的嵌入

将宿主音频信号做三级小波分解, 得到逼近分量  $\mathbf{cA}_3$ 。然后将其分为两段, 每段分别嵌入水印以抵抗时间轴同步攻击。下面以其中的一段为例来说明水印信号的嵌入过程。为了精确地定位水印的嵌入位置, 先嵌入一段同步码, 然后在其后面选择符合条件的系数进行水印的嵌入。由于  $m$  序列自

相关函数具有尖锐的特性, 因此, 选择  $m$  序列作为同步码。同步码的嵌入原理<sup>[12]</sup>如下:

$$c'_n = \begin{cases} [c_n/\alpha]\alpha + 3\alpha/4, & m_n = 1 \\ [c_n/\alpha]\alpha + \alpha/4, & m_n = 0 \end{cases} \quad (4)$$

其中  $\{c_n\}$  为三级小波系数,  $\{m_n\}$  为  $m$  序列,  $\{c'_n\}$  为嵌入同步码后的逼近分量系数,  $\lfloor \cdot \rfloor$  为下取整函数。 $\alpha$  为一非零常数, 在不影响透明性的前提下, 其取值应尽量大一些。

同步码嵌入之后, 在其后的系数中选择绝对值大的、与嵌入水印信号长度相等的系数构成一路信号, 记为  $\mathbf{s}$ 。

将水印信号  $w$  和选定的系数  $\mathbf{s}$  作为两路源信号, 利用线性混合方法进行嵌入, 混合过程如式(5)所示:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \mathbf{sw}_1 \\ \mathbf{sw}_2 \end{bmatrix} = \mathbf{A}_2 \mathbf{S} = \begin{bmatrix} a'_{11} & a'_{12} \\ a'_{21} & a'_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{s} \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a'_{11}\mathbf{s} + a'_{12}w \\ a'_{21}\mathbf{s} + a'_{22}w \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中  $\mathbf{A}_2$  为满秩矩阵, 为了保证透明性, 需要满足  $a'_{11} \gg a'_{12}$ ,  $a'_{21} \gg a'_{22}$  的条件。获得的两路信号中,  $\mathbf{sw}_1$  用来替换选定的嵌入系数, 进行小波反变换后得到隐秘音频信号,  $\mathbf{sw}_2$  作为密钥  $k_3$  保留。

### 4 水印信号的提取

在水印提取过程中, 可以通过给检测端传输混合矩阵来提取水印。但是由于传输的混合矩阵通常会受到传输信道的干扰和人为的攻击, 使得水印提取效果变差, 影响水印的鲁棒性。因此, 本文采用盲水印提取方法, 利用快速、效果好的独立分量分析算法来提取水印信号。

水印信号的提取是嵌入的逆过程。借助于保留的密钥, 利用快速独立分量分析(FastICA)算法来完成嵌入水印信号的提取, 进而获得两幅原始水印图像。水印提取原理框图如图2所示。

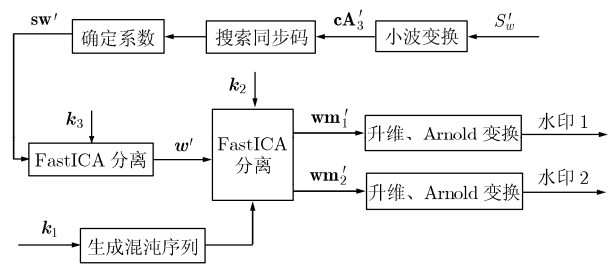


图2 水印信号提取原理框图

由于隐秘信号可能受到各种攻击, 因此, 在水印提取部分采用了与水印嵌入部分不同的符号表示。将待检测的隐秘信号做三级小波变换, 得到逼近分量  $\mathbf{cA}'_3$ 。然后将  $\mathbf{cA}'_3$  进行二值化, 以便搜索同步码, 二值化公式如下:

$$m'_n = \begin{cases} 1, & c_n^* - [c_n^*/\alpha]\alpha \geq \alpha/2 \\ 0, & c_n^* - [c_n^*/\alpha]\alpha < \alpha/2 \end{cases} \quad (6)$$

其中  $\{c_n^*\}$  为隐秘信号的小波系数,  $\{m'_n\}$  为包含同步码在内

的二值序列。

将序列  $\{m_n\}$  和  $\{m'_n\}$  做相关运算, 如果相关值大于预先设定的域值  $T$ , 就判其为同步码。

同步码确定以后, 按照嵌入时的规则, 选择含水印信息的系数向量  $\mathbf{sw}'$ , 与保留的密钥  $\mathbf{k}_3$  一起作为两路观测信号, 利用 FastICA 算法对两路信号进行分离, 获得两路输出信号, 根据两路信号四阶统计量的大小, 判断出嵌入水印信号  $w'$ 。

获得嵌入水印信号  $w'$  后, 将  $w'$ 、密钥  $\mathbf{k}_2$  以及利用密钥  $\mathbf{k}_1$  生成的等长混沌序列作为三路观测信号, 进一步利用 FastICA 算法对其进行分离, 获得包含原始二值水印图像的两路一维信号。将这两路一维信号升维, 进行 Arnold 变换, 即可提取出两幅原始二值水印图像。

## 5 实验结果

在实验中采用的宿主音频信号采样率为 44.1kHz, 长度为 131072 点。实验中参数设置如下:  $\alpha = 8000$ ;  $\mathbf{A}_1$  的元素设置为  $a_{11} = 0.01$ ,  $a_{12} = 0.53$ ,  $a_{13} = 0.46$ ,  $a_{21} = 0.02$ ,  $a_{22} = 0.47$ ,  $a_{23} = 0.51$ ;  $\mathbf{A}_2$  的元素设置为  $a'_{11} = 0.97$ ,  $a'_{12} = 0.03$ ,  $a'_{21} = 0.99$ ,  $a'_{22} = 0.01$ ; 同步码判决阈值  $T = 0.7$ 。下面从透明性和鲁棒性两个方面对该水印方法进行了测试。

### 5.1 透明性测试

宿主信号和隐秘信号的时域波形如图 3(a)和图 3(b)所示。由波形图可以看出, 二者在波形上几乎没有差别; 听音测试也表明, 二者之间在听觉质量上没有可以察觉的失真, 表现了良好的透明性。

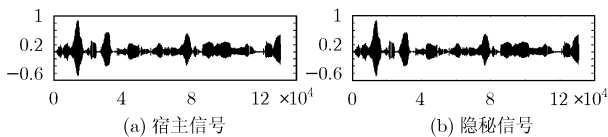


图 3 音频信号波形图

### 5.2 鲁棒性测试

图 4 给出了隐秘信号在经过剪裁、mp3 压缩、低通滤波、添加高斯白噪声、重量化及重采样等各种常规信号处理操作后提取出的水印图像。

由图 4 可以看出, 在低通滤波、添加高斯白噪声和重采样三种攻击情况下, 从隐秘信号中提取出的两幅水印图像中的一幅图像质量有所下降, 但是并不影响其信息的表达。这是由于两个水印信号的统计特性不同, 与混沌序列特性更相近的水印信号在提取时受到的干扰比较大, 从而造成提取时两幅图像所产生的差异。其它情况下提取出的水印十分清晰。表明该方法具有较好地抵抗上述各种攻击的能力, 鲁棒性好。同时, 由于嵌入了同步码, 使得该方法对剪裁攻击表现出了比较好的抗攻击能力。

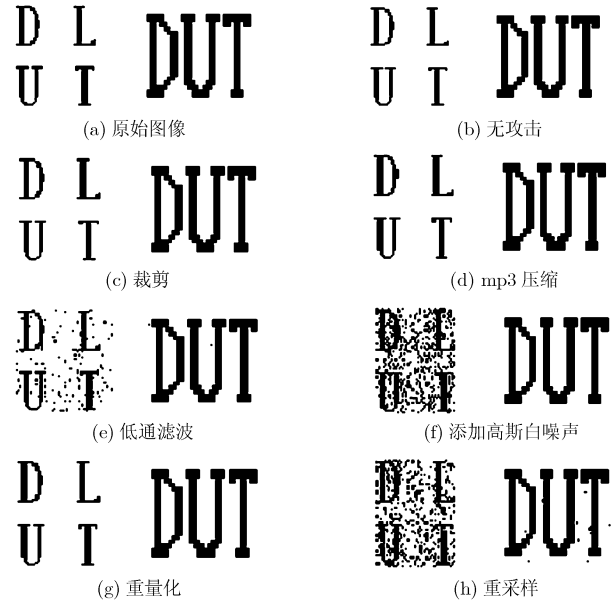


图 4 各种攻击情况下提取的图像

## 6 小结

本文提出一种基于盲源分离的小波域多重音频水印方法。利用线性混合可将多个原始水印图像混合成一个水印信号嵌入到宿主音频中。利用 Arnold 变换和混沌序列对水印进行双重置乱处理, 确保了水印的安全性。在水印嵌入过程中引入了同步码, 能够有效地抵抗时间轴上的剪裁攻击。实验结果表明, 本文提出的方法在对抗剪裁、mp3 压缩、低通滤波、添加高斯白噪声、重量化及重采样等各种攻击时, 都能表现出较好的鲁棒性。

## 参考文献

- [1] Swanson M D, Zhu B, and Tewfik A H, *et al.* Robust audio watermarking using perceptual masking. *Signal Processing*, 1998, 66(3): 337-355.
- [2] Arnold M. Audio watermarking: features, applications and algorithms. *IEEE International Conference on Multimedia and Expo*, New York, USA, 2000: 1013-1016.
- [3] 张华熊, 仇佩亮. 用于版权保护的鲁棒音频水印. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2002, 14(8): 786-789.
- [4] Lie W N and Li C C. Robust and high-quantity time-domain audio watermarking based on low-frequency amplitude modification. *IEEE Trans. on Multimedia*, 2006, 8(1): 46-59.
- [5] Pan J S, Huang H C, and Wang F H. A VQ-based robust multi-watermarking algorithm. *IEEE Region 10 Conference on Computers, Communications, control and Power Engineering*, Beijing, China, 2002: 117-120.
- [6] Kim T Y, Choi H, and Lee K, *et al.* An asymmetric watermarking system with many embedding watermarks corresponding to one detection watermark. *IEEE Signal*

- Processing Letters*, 2004, 11(3): 375-377.
- [7] Huang W L and Gou J. An image fusion-based multi-watermarking algorithm. *IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control*, Florida, USA, 2006: 266-269.
- [8] 张贤达, 保铮. 盲信号分离. *电子学报*, 2001, 29(12): 1766-1771.
- [9] Hyvärinen A. A fast fixed-point algorithm for independent component analysis. *Neural Computation*, 1997, 9(7): 1483-1492.
- [10] Zou J and Word R K. Introducing two new image scrambling methods. *IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and signal Processing*, Victoria, Canada, 2003: 708-711.
- [11] 张志明, 王磊. 基于混沌加密的DCT域图像水印算法. *计算机工程*, 2003, 29(17): 9-10, 39.
- [12] Wu S Q, Huang J W, and Huang D R, *et al.* Efficiently self-Synchronized audio watermarking for assured audio data transmission. *IEEE Trans. on Broadcasting*, 2005, 51(1): 69-76.
- 马晓红: 女, 1967年生, 副教授, 博士, 主要从事音频水印和阵列信号处理的理论与应用研究工作.
- 孙长富: 男, 1981年生, 硕士, 从事音频水印技术的研究工作.