

数字图书馆音频信息资源版权保护研究*

兰宇琳

(湘南学院图书馆, 郴州 423000)

摘要: 针对数字图书馆的音频资源版权保护问题, 提出一种基于奇异值分解及独立成分分析的数字音频水印算法。奇异值分解具有数据压缩的特性, 将水印信息经过奇异值分解处理, 可大大提升水印容量, 而独立成分分析理论可实现水印的盲提取。选择小波变换后的低频系数作为水印嵌入点, 以平衡水印的鲁棒性和透明性。采用二值图像作为水印进行仿真实验, 实验结果显示该水印方案具有较好的鲁棒性、透明性。

关键词: 数字音频水印算法; 奇异值分解; 独立成分分析; 离散小波变换

中图分类号: TP391

DOI: 10.3772/j.issn.1673—2286.2015.01.008

1 引言

数字图书馆的信息资源版权保护问题, 一直是制约图书馆发展的关键因素。这一问题涉及法律、道德、技术等多个领域的参与和协作, 许多专家学者从自身领域出发对此进行了研究并提出了许多的解决方案。而技术方案是解决这一问题的基础支撑, 目前使用最广泛的保护手段就是数字水印技术。数字水印技术在数字图书馆信息资源版权保护中的应用已经取得了一定的成果, 尤其针对图像资源的保护^[1-2]。然而其他形式的资源, 如音频资源的研究却相对缺乏, 针对此主题利用中国知网期刊数据库进行检索, 得到相应的论文仅有2篇, 且研究内容还限于理论概述, 杨子伍^[3]提到水印分类中的音频水印的研究集中于低比特位编码、相位编码等方面, 邓伟等^[4]在教育资源的版权保护中简要综述了基于数字水印技术的音频教育资源的研究现状并提出一个音频资源的版权保护方案的框架。因此, 本文专门研究数字图书馆的音频信息资源版权保护问题, 提出了一种基于奇异值分解及独立成分分析的数字音频水印算法。并

通过仿真实验验证算法的鲁棒性、透明性和安全性。

2 相关概念

2.1 奇异值分解

奇异值分解^[5] (Singular Value Decomposition, SVD) 是线性代数矩阵分解中的一种最优矩阵分解技术, 可用于求伪逆、平行奇异值模型及矩阵近似值。而矩阵近似值常应用于信号处理、统计学等领域, 本文也是利用其此方面的应用。求矩阵近似值的基本思路是将矩阵映射到低维空间去, 用奇异值来代表矩阵的特征值, 并将这些特征值按重要性进行排序, 可达到数据压缩、模式识别的作用。用 $A \in \mathbb{C}^{m \times n}$ 表示一个矩阵, 则SVD的数学模型如式(1)所示^[6]:

$$A = USV^T = U \begin{bmatrix} r_{11} & & & \\ & r_{22} & & \\ & & \ddots & \\ & & & r_{mm} \end{bmatrix} V^T \quad (1)$$

* 本研究得到湘南学院2014年度科研基金校级项目“基于数字水印技术的数字图书馆版权保护研究”(编号: 2014XJ62)资助。

其中, $U \in R^{m \times n}$ 和 $V \in R^{m \times n}$ 都为正交矩阵, 满足 $UU^T = I$, $VV^T = I$, $S \in R^{m \times n}$ 为对角阵, 对角元素则为矩阵A所求得奇异值。

2.2 独立成分分析

独立成分分析^[7](Independent Component Analysis, ICA)是信号处理中的一种统计方法, 用来从多个混合的数据中提取出相互独立的数据。比如著名的鸡尾酒会效应, 在酒会中各种声音混杂在一起, 通过放置在酒会中不同位置的录音设备所收集到的混合数据源来提取每个单独的声音, 这就是独立成分分析理论所要解决的问题。

用数学模型来表示ICA的处理过程^[8]。假设有n个随机的观测信号 $x_1, \dots, x_n$ 和n个未知变量 $s_1, \dots, s_n$, 将两者线性混合:

$$x_i = a_{i1}s_1 + a_{i2}s_2 + \dots + a_{in}s_n \quad (2)$$

上式中对所有的 $i=1, \dots, n$, $a_{ij}, i, j=1, \dots, n$ 都是实系数, 且假设 S_i 是统计意义上的独立成分。这就是基本的ICA模型。采用向量矩阵的形式来表示, 可写为如下形式:

$$x = As. \quad (3)$$

其中, $x^T = [x_1, \dots, x_n]$, $s^T = [s_1, \dots, s_n]$, A是一个 $n \times n$ 维的矩阵, 将其称之为混合矩阵。ICA的目标就是估计矩阵s的值, 换句话说, 找到一个非混合矩阵W, 并使其满足以下条件:

$$y = Wx = WAs \quad (4)$$

由上式可知 $y^T = [y_1, \dots, y_n]$ 就是我们所要求的原始信号, W的大小也是 $n \times n$ 且W等于 A^{-1} 。

从以上分析可知, ICA的目标与水印的提取过程很相似, 因此将其用于水印提取可实现盲提取。

3 基于奇异值分解及独立成分分析的音频水印算法

评价水印算法的好坏标准主要体现在三方面: 鲁棒性、透明性及安全性, 而鲁棒性和透明性本身又是一对矛盾, 因此, 在设计算法时如何平衡两方面的性能是需要重点考虑的。其次, 水印嵌入量的多少直接影响水

印算法的实用价值。结合考虑这两个问题, 设计出本文所提出的数字音频水印方案, 采用奇异值分解数据压缩的特性来增大水印的嵌入容量, 利用小波变换多分辨率的特性来平衡水印算法的鲁棒性和透明性, 独立成分分析理论则用来实现水印的盲提取。

3.1 水印嵌入方案

水印嵌入包括三个方面的工作: 水印预处理、系数选择及水印嵌入。水印预处理是将水印信息压缩, 也就是利用奇异值分解得到水印的重要信息作为真正嵌入载体中的水印。系数选择也就是选择水印的嵌入位置, 是水印方案的关键, 影响着整个水印算法的鲁棒性和透明性, 因此, 本文嵌入位置选择总的原则是: 找到音频信号中能量值较高的点。最后, 将处理好的水印嵌入已选择的系数中, 采用的是构造ICA模型的方式。水印嵌入流程如图1所示:

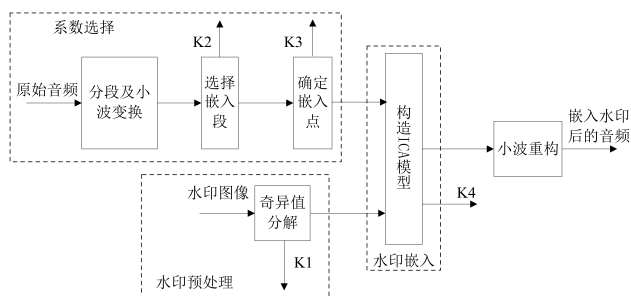


图1 水印嵌入流程图

3.1.1 水印预处理

水印是一幅大小为 $N \times M$ 的二值图像, 用

$$Z = \{z(i, j) | 0 < i \leq N, 0 < j \leq M\}, z(i, j) \in \{0, 1\}$$

来表示。对Z进行奇异值分解如下所示:

$$B = UZV^T \quad (5)$$

将 $Z_i = Z(i, j), i=1, \dots, M$ 对角阵中的系数量化到(0,1)范围内, 作为待嵌入的水印信息保存; 并将U和V矩阵信息作为密钥K1保存。

3.1.2 系数选择

为了平衡水印的鲁棒性和透明性, 并尽可能的提高

鲁棒性, 本文选择在小波域进行水印嵌入, 将变换后的低频系数中能量值较大的作为嵌入点。假设 $S = \{s(i) | i=1, \dots, L_s\}$ 表示原始的音频信号, 其中 L_s 表示音频 S 的长度。详细的系数选择过程如下:

(1) 分段。将音频 S 分成 $q (q \geq 2M)$ 段, 则每段有 $\lfloor L_s / q \rfloor$ 个采样点, 且 $\lfloor L_s / q \rfloor > M \times 2^H$ 。如果 L_s / q 结果不为整数, 则音频 S 分成 $q+1$ 段, 第 $q+1$ 段的采样点数目为 $L_s - q \times \lfloor L_s / q \rfloor$ 个, 且对最后一段不采取操作。

(2) 选择嵌入段。对分段后的音频 S 进行 H 层的离散小波变换, 得到低频分量 $A_{i(k)}^H$ 和 高频分量 $D_{i(k)}^H, D_{i(k)}^{H-1}, \dots, D_{i(k)}^1$ 。音频信号的能量集中于低频分量中, 因此, 计算各段低频分量 $A_{i(k)}^H$ 总的能量值, 并按从高到低的顺序进行排序, 选择前 N 段作为水印嵌入段, 同时将前 N 段音频的索引记录作为密钥 $K2$ 保存。

(3) 确定嵌入点。对于选择好的前 N 段, 将各段的低频系数按绝对值的大小从大到小进行排序, 选择能量值排列前 M 位的低频系数作为准确的水印信号嵌入点, 记为 **selected-bit**, 大小为 $N \times M$ 。同样将每段前 M 位嵌入点的索引记录作为密钥 $K3$ 保存, 大小也为 $N \times M$ 。

3.1.3 水印嵌入

水印嵌入的过程实际是构造 ICA 模型的过程。首先, 为了保证水印算法的透明性, 将满秩混合矩阵

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ b_{11} & b_{12} \end{bmatrix} \quad \text{的参数设置为 } a_{11} \gg a_{12}, b_{11} \gg b_{12}。$$

其次, 使用预处理之后的一维待嵌入水印信号 $Z_i = Z(i, j), i=1, \dots, M$ 构造大小为 $N \times M$ 的源信号 $O_{N \times M}$, 构造过程如式(6)所示, 并且与选择好的嵌入水印的系数 **selected-bit** 进行合并得到 $\tilde{s} = [\text{selected-bit } O]^T$, 意味着, 每个嵌入段中嵌入的水印信息是相同的。最后将 A 与 $\tilde{s}$ 线性混合, 即 ICA 模型构造完成, 过程如式(7)所示, 得到两个观测信号 X_1 和 X_2 , 将信号 X_2 作为密钥 $K4$ 保存。

$$O_{N \times M} = \left\{ O(k, l) = \begin{bmatrix} Z_i \\ Z_i \\ \vdots \\ Z_i \end{bmatrix} \middle| k=1, \dots, N; l=1, \dots, M \right\} \quad (6)$$

$$x = A\tilde{s} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ b_{11} & b_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{selected-bit} \\ O \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11}\text{selected-bit} + a_{12}O \\ b_{11}\text{selected-bit} + b_{12}O \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

水印嵌入之后需将音频信号恢复至空间域, 也就

是小波分解重构。用观测信号 X_1 替换所选择的嵌入系数 **selected-bit**, 进行逆小波变换, 并且加上未操作的最后一段数据 (如果有的话), 得到最终嵌入水印后的音频信号。

3.2 水印提取方案

水印提取包括三部分工作, 系数提取、ICA 估计及 SVD 重构。水印提取的关键是找到观测信号分量 $\tilde{x}_1$, 系数提取就是完成这部分工作, 流程与水印嵌入中的系数选择过程类似。ICA 估计过程调用 Fast ICA 算法对构造好的混合信号进行水印提取。最后, 对提取出的信息 SVD 重构得到嵌入的水印信息。水印提取方案流程如图2所示:

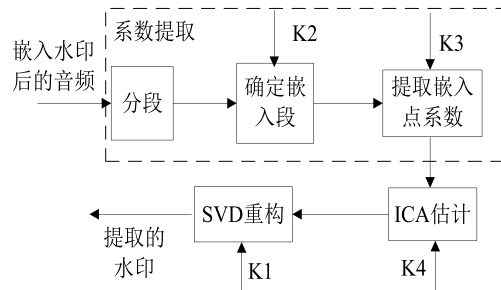


图2 水印提取方案流程图

具体步骤如下:

(1) 系数提取。假设嵌入水印后的音频信号为 $\tilde{S} = \{\tilde{s}(i) | i=1, \dots, L_s\}$, 将其分为 q 段, 根据保存的密钥 $K2$ 确定嵌入段, 并对嵌入段进行 H 层的离散小波变换得到各段的低频系数 $\tilde{A}_{i(k)}^H (i(k) \in \{1, \dots, q\}, k = \{1, \dots, N\})$, 最后根据密钥 $K3$ 找到嵌入水印的系数点 $\tilde{x}_1$ 。

(2) ICA 估计。将提取的系数 $\tilde{x}_1$ 与密钥 $K4$ 混合构成观测信号 $\tilde{x} = [\tilde{x}_1 \text{ key4}]^T$, 使用 Fast ICA 算法对混合信号进行水印提取, 得到 $\tilde{O}_{N \times M}$, 通过计算每一列的均值, 得到嵌入的水印信号 $\tilde{S}_i$ 。

(3) SVD 重构。根据密钥 $K1$ 所保存的 U 和 V 的信息, 与 $\tilde{S}_i$ 计算得到奇异值分解前的矩阵 $\tilde{B}$, 也就是水印信息, 如式(8)所示。

$$\tilde{B} = U\tilde{S}V^T \quad (8)$$

4 仿真实验及分析

使用 matlab 来进行仿真实验, 原始载体音频选择的

是一段16s的单声道信号,该音频的采样率和量化位数分别为44.1kHz和16bits。水印信息选择的是一幅大小为64×64的二值图像。为了保证水印的鲁棒性和透明性,将实验中的参数做一些设定,令 $a_{11}=0.92$, $a_{12}=0.08$, $b_{11}=0.99$, $b_{12}=0.01$, $H=3$ 以及采用db2小波基。

另外,采用定量的指标来衡量水印算法的性能。归一化相关系数(NC)比较的是提取的水印和原始水印的相似程度,结果越接近1,表示越相似;信噪比(SNR)则是用来评价水印方案的透明性,信噪比值越大说明透明性越好。它们的计算公式分别如式(9)、(10)所示^[9-10]:

$$NC(W,W') = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N W(i,j)W'(i,j)}{\sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N W^2(i,j)} \sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N W'^2(i,j)}} \quad (9)$$

$$SNR(s,s') = 10 \lg \frac{\sum_{i=1}^L s_i^2}{\sum_{i=1}^L (s_i - s'_i)^2} \quad (10)$$

其中, W 和 W' 分别代表原始水印和提取的水印信息, L 表示音频信号的长度, S 和 S' 分别代表原始的载体音频和嵌入了水印的音频信号。

4.1 透明性测试

采用主观和客观两种方法验证本方案的透明性。主观评测法,以人耳为判断标准,分别听原始的音频和嵌入水印后的音频,结果是感觉不到任何差异;客观评价法,以计算原始音频和嵌入水印后音频的信噪比来衡量水印方案的透明性,计算结果为24.2137db,说明两种音频之间的差异很难分辨。嵌入水印前后的音频信号并无区别。

4.2 鲁棒性测试

采用“Stirmark for Audio v02”软件来攻击嵌入水印后的音频信号,并提取不同攻击后的水印信息,通过计算归一化相关系数来评价本水印方案的鲁棒性。攻击后提取的水印图像如图3所示,表1给出了不同攻击后提取水印信息的NC值。

其中图片(a)代表原始水印图片,(b)-(p)分别是经过不同类型攻击后提取的水印图片,具体的攻击类型在表1中给出



图3 不同攻击下提取的水印图像

表1 仿真实验结果

攻击类型	信噪比	归一化相关系数
(b) 无攻击	24.2137	1.0000
(c) 添加高斯白噪音(5 db)	5.2237	0.9729
(d) 添加高斯白噪音(10db)	9.6589	0.9883
(e) 放大	5.8042	1.0000
(f) 压缩	19.7649	0.9964
(g) 交换	17.5569	1.0000
(h) 傅里叶变换	23.1152	1.0000
(i) 去采样点(1/100)	13.1321	0.9673
(j) 最低有效位置0	23.1517	1.0000
(k) 标准化	10.7433	1.0000
(l) 低通滤波	21.8987	0.9953
(m) 平滑	22.4185	1.0000
(n) 0交替	19.4347	1.0000
(o) 重量化(16-8-16bit/sample)	22.3148	0.9997
(p) 重采样 (44.1-96-44.1kHz)	20.5594	0.9954

从图3及表1可知,本算法方案在经过14中不同的攻击后,水印信息仍然能够提取且可辨识,说明本方案是可行的且具有较强的鲁棒性,能够抵抗常见的攻击。

4.3 安全性测试

采用以下三种操作来测试算法的安全性:(a)使用正确的密钥在嵌入水印的音频中提取水印,(b)使用正确的密钥在未嵌入水印的音频中提取水印,(c)使用错误的密钥在嵌入水印的音频中提取水印。结果如图4所示:

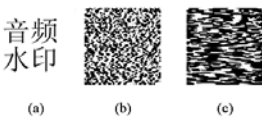


图4 不同操作下提取的水印图像

从测试结果可知,只有使用正确的密钥才能在嵌入水印的音频中正确的提取。因此,密钥大大提高了水印

方案的安全性。

5 总结

针对数字图书馆音频资源的版权保护技术解决方案空白的问题,充分利用奇异值分解、独立成分分析及离散小波变换的特性,提出了一种基于奇异值分解及独立成分分析的音频水印算法。该算法具有水印容量增加、盲提取及提高鲁棒性并保证透明性等特点,且仿真实验证实了本算法的可行性。但是,实验样本采用的是单声道音频,水印信息为二值图像,在实际应用中有一定的局限性,后续需继续完善。

参考文献

- [1] 沈晓艳,崔新春,于建峰.数字水印技术在数字图书馆中的应用现状分析[J].山东图书馆学刊, 2011(5): 50-54.
- [2] 阳广元,邓进.2007-2011年国内基于数字水印的版权保护研究综述[J].图书情报工作,2013,57(S2): 46-49.
- [3] 杨子伍.数字图书馆建设中知识产权保护的关键技术[J].河南图书馆学刊,2006,26(2):115-117.
- [4] 邓伟,邓冠群,刘清堂.基于数字水印的教育资源版权保护[J].现代教育技术,2013,23(3):91-94.
- [5] 朱光,张军亮.基于提升小波变换和SVD的音频水印算法[J].计算机应用与软件,2014,31(2):149-152,156.
- [6] 段岁军,范九伦.一种基于SVD和DWT的音频水印算法[J].计算机应用研究, 2014,31(7):2116-2118.
- [7] A Hyvarinen. Independent Component Analysis[M]. John Wiley and Sons, 2001.
- [8] 戴华亮.数字音频水印技术的研究[D].上海:上海交通大学,2010.
- [9] Ali Al-Haj, Ahmad Mohammad. Digital Audio Watermarking Based on the Discrete Wavelets Transform and Singular Value Decomposition[J]. European Journal of Scientific Research,2010,39(1):6-21.
- [10] Hua-liang Dai, Di He. Robust Digital Audio Watermarking Scheme Using Blind Source Separation with Global Optimal Property[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University(Science), 2010,15(1):13-18.

作者简介

兰宇琳,女,1988年生,湘南学院图书馆助理馆员,研究方向:数字水印,E-mail: lanyl0000@126.com。

Research on Copyright Protection of Audio Resource in Digital Library

LAN YuLin

(Library Of Xiangnan University, Chenzhou 423000, China)

Abstract: This paper proposed a digital audio watermarking scheme based on Singular Value Decomposition(SVD) and Independent Component Analysis (ICA), in order to solve the copyright protection issues in digital library. The watermark information processed by the SVD which has the data compressed feature enhances the watermark capacity. ICA used for watermark extraction and achieve the blind extraction. Select the low frequency coefficients after Discrete Wavelet Transform(DWT) as an embedded point, in order to balance the transparency and robustness of the audio. The experiment results show that the proposed scheme has good robustness against common attacks, as well as transparency.

Keywords: Digital audio watermarking algorithm; Singular value decomposition; Independent component analysis; Discrete wavelet transform

(收稿日期: 2015-01-07)

编辑: 刘伟