

一种基于小波变换的音频脆弱水印算法

陆佰林, 朱艳琴, 蒋一鸣, 王振中

(苏州大学 计算机科学与技术学院, 江苏 苏州 215006)

摘要: 数字音频水印算法是水印技术中重要的组成部分, 而近年来对音频水印的研究远远少于图像水印, 脆弱水印的研究则更加少。提出了一种基于小波变换的音频脆弱水印算法, 在音频信号的小波变换域嵌入二值图像水印, 采用量化嵌入方法, 实现了盲提取。仿真实验结果表明, 此算法具有较好的不可闻性、敏感性和安全性。

关键词: 脆弱水印 小波变换 量化 不可闻性

近年来, 随着数字网络通信技术的迅速发展, 多媒体信息的传输变得极为方便, 大量多媒体信息(声音、图像、视频等)得以通过网络广泛地传播, 极大地改善了人类的物质文化生活, 也给人们带来了丰富多样的视听享受。但由于数字多媒体易于被复制、修改的特性, 使得大量数字多媒体作品的版权得不到有效的保护。

传统的版权保护系统多采用密码认证技术, 但采用密码并不能完全有效地解决版权保护问题。近几年人们提出了一种新的数字产品版权保护技术——数字水印。该技术被认为是解决数字产品知识产权问题的重要手段, 已经成为当前的热点研究领域之一。数字水印一般包括鲁棒性水印和脆弱性水印, 目前对鲁棒性水印的研究很多, 而对于脆弱性水印的研究则较少。本文提出一种基于量化的小波域数字音频脆弱水印算法, 该算法能够有效地对音频信号的真伪和完整性进行判别^[1]。仿真实验结果表明, 此算法具有较好的不可闻性、脆弱性和安全性^[2]。

1 算法原理与实现

音频数字水印嵌入算法是音频信息水印处理技术

中重要的组成部分。由于人的听觉系统要比视觉系统更敏感, 相对于静止图像和视频信息, 在音频信息中嵌入数字水印更为困难。本文根据音频的特点在音频的小波域嵌入水印, 而且水印的提取不需要原音频信息, 实现了盲检验。对于非法篡改者, 音频很小的改动都会引起水印的无法正常提取, 从而达到了完整性认证。

1.1 算法原理

小波变换是将信号分解成时域和尺度域的一种变换^[3], 尺度域可以对应于频域, 因此小波变换是一种对音频时变信号进行时频分析的很好的工具。小波变换具有多分辨率分析的特点, 在时频两域都有表征信号局部特征的能力, 即在低频部分有较高的频率分辨率和较低的时间分辨率, 而在高频部分有较高的时间分辨率和较低的频率分辨率。通过小波分析, 音频信息被分为两部分: 低频分量 ca 和 高频分量 cd 。低频分量还可以继续分解以进行更高级别的小波分析。

水印嵌入提取算法如图 1 所示。在水印嵌入部分, 先对信号进行 L 级小波分解, 根据小波的多分辨特性, 小波的低频分量集中了信号的大部分能量, 而在小波的高频分量则只有小部分的能量。所以应在小波的高频分量

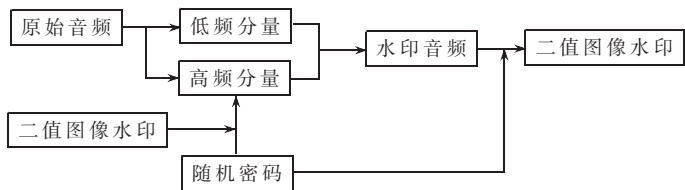


图1 水印算法示意图

嵌入脆弱水印,以满足敏感性要求。嵌入水印之后对低频分量和高频分量进行小波逆变换,恢复音频信息,然后从含水印音频提取二值图像水印。在嵌入和提取阶段都使用了随机密码以保证算法的安全性。在嵌入过程中,为了满足水印敏感性的要求,水印信息应该均匀地扩散到数字音频信号的所有高频系数中^[4]。

1.2 水印嵌入过程

1.2.1 水印预处理

本算法嵌入的水印信号是一个二值图像 $I(M,N)$,为了将二维的二值图像嵌入到一维的数字音频信号中,在嵌入之前对其进行降维处理,即将二维图像变为一维序列^[5]:

$$V=\{V(k)=I(m,n),1\leq m\leq M,1\leq n\leq N,k=(m-1)*N+n\} \quad (1)$$

通过降维操作,水印 I 中的像素 $I(m,n)$ 由序列 V 中的元素 $V(k)$ 表示, V 的长度为 $M\times N$ 。之后再利用一长度为 $M\times N$ 的伪随机序列 P 对 V 进行调制,得到新的序列 $V1$:

$$V1=V \text{ XOR } P, V(i)=\{0,1\}, P(i)=\{0,1\} \quad (2)$$

将 $V1$ 作为要嵌入的水印序列。(2)式中的伪随机序列 P 对算法的安全性起着重要作用,由于 P 的伪随机性, $V1$ 也具有伪随机的特性,在攻击者不了解 P 的情况下,很难检测到水印并将其破坏掉。

1.2.2 小波变换及嵌入系数选取

对原始音频信号进行三级分解,保留第三级的逼近分量 $ca3$ 不变,把三级的细节分量小波系数重新组合为一个系数序列 cd ($cd=cd1+cd2+cd3$, 其中, $cd1$ 、 $cd2$ 、 $cd3$ 分别是第一、二、三级小波分量的系数)。在此序列中随机选取 $M\times N$ 个系数 (Mu) 用来嵌入水印。在这里,由于嵌入系数是随机选取的,因而能够保证水印序列嵌入 $cd1$ 、 $cd2$ 、 $cd3$ 的概率是近乎相当的,而且在每一级的细节分量中所选的小波系数是分布均匀的,这样就保证了嵌入的水印信息能够均匀地扩散到所有的细节信号中,使嵌入的水印能够反映出数字音频信号的时域变化和频域变化。

1.2.3 水印的量化嵌入

嵌入系数选定之后,使用量化方法嵌入水印信息,以达到盲检测的目的^[6]。对二值图像水印得到的二值序列 $V1$ 进行量化,分别如公式(3)、(4)所示。

当 $V1_j=0$ 时

$$Muw_j=\text{round}\left(\frac{Mu_j}{\Delta}\right)\times\Delta \quad (3)$$

当 $V1_j=1$ 时

$$Muw_j=\text{round}\left(\frac{Mu_j+\Delta/2}{\Delta}\right)\times\Delta-\frac{\Delta}{2} \quad (4)$$

式中, Mu_j 是嵌入水印之前在三个细节分量组合的序列 cd 中随机选取的第 j 个系数 ($j\leq M\times N$), Mu_wj 是嵌入水印之后细节分量 cd 中所对应的第 j 个系数, Δ 是量化步长, round 为取整函数。用上两式将水印信息嵌入到原始数据中。如果 $V1_j$ 为 0,则修改后的小波系数 Mu_wj 落在 $k\Delta$ 处;如果 $V1_j$ 为 1,则 Mu_wj 落在 $k\Delta+\Delta/2$ 处。量化步长 Δ 取得越大,鲁棒性越高。为了保持敏感性, Δ 不能取得太大。通过试验选取嵌入系数附近的几个系数的能量作为量化步长,以做到自适应量化。

1.2.4 小波重构

水印嵌入完成后,把修改了 $M\times N$ 个系数后的 cd 重新按原信号的三个细节分量分为 $cd3w$ 、 $cd2w$ 、 $cd1w$ 。与第三级未改变的逼近分量 $ca3$ 一起完成小波重构,得到嵌入水印后的音频信号。

1.3 水印检测过程

本文中提出的水印嵌入算法使用了量化处理过程,这使得在水印的提取过程中不需要原始的数字音频信号,是一种盲水印算法。

1.3.1 水印提取

与嵌入水印过程相似,先对含水印音频进行三级小波变换,保留第三级的逼近分量不变,把三级的逼近分量小波系数组合为一个系数序列 cd ,按照嵌入水印时的随机处理,选取 cd 中的 $M\times N$ 个系数,利用公式(5)提取二值序列 VV 。

$$VV_j=\frac{1}{2}\left[1-(-1)^{\text{round}\left(\frac{Mu_wj\times 2}{\Delta}\right)}\right] \quad (5)$$

式中, Mu_wj 为待检的第 j 个系数, VV_j 为提取二值序列的第 j 个值。根据 Mu_wj 与 $k\Delta$ (或 $k\Delta+\Delta/2$) 的距离恢复出水印信息,即距 $k\Delta$ 较近得到为 0;距 $(k\Delta+\Delta/2)$ 较近则得到 1。

再把得到的 VV 与嵌入水印时的调制序列 P ‘异或’,得到 VVw 。然后把一维序列 VVw 升维到二维序列,得到二值图像水印 Iw 。

1.3.2 水印评价

对于二值图像,可以直观地辨认出水印的相似度。在这里,为了克服观测者经验、实验条件和设备条件等主观因素的影响,本文采用峰值信噪比对原始识别水印和提取的水印的相似度作客观评价^[7]:

$$PSNR=\frac{L_{\max}Y_m^2}{\sum_m(Y_m-Yw_m)^2} \quad (6)$$

式中, Y_m 代表原始音频第 m 个采样点, Yw_m 代表嵌入水印后的音频第 m 个采样点, L 表示音频的采样点总数。

对于提取的水印 Iw ,计算 Iw 与原二值水印 I 的相关质量,以评价水印的失真程度 Cq :

$$Cq=\frac{\sum_{m,n} I_{(m,n)}Iw_{(m,n)}}{\sum_{m,n} I_{(m,n)}} \quad (7)$$

如果 C_q 大于预设的阈值,则认为音频信息含有正确的水印^[7]。

2 实验结果

在实验中,采用长度为 10 秒,采样频率为 44.1kHz,16bit 量化,内容为一段音乐的单声道音频信号行,如图 2 所示。图 3 为嵌入水印后的音频信号。识别水印采用 64×64 的二值图像,内容为“苏州大学”四个字的一个标签,如图 4(a)所示。图 4(b)为从图 3 所示的音频信号提取的识别水印。

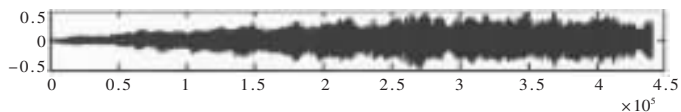


图 2 原始音频信号

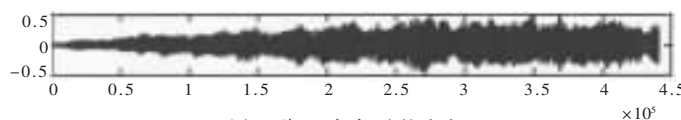


图 3 嵌入水印后的音频



(a) 原水印图像 (b) 提取的水印图像
图 4 水印图像

从图中可以看出,人眼几乎分辨不出嵌入水印前后音频与水印各自的区别。实验中,让 20 个听觉正常的人反复听嵌入水印前后的两段音乐,同样分辨不出哪一个是嵌入水印的音乐段,可见算法具有很好的不可闻性。而通过所提取的水印序列计算的相关质量为 $C_q=1$,证明提取的识别水印是正确的,所得峰值信噪比 $PSNR=63.533$ 。

水印攻击的实验结果如图 5 所示。在这里,主要采用了重新量化、重采样、有损压缩、噪声干扰等^[4,7,8]攻击方法。

重新量化:先对信号由原来的 16bit 量化为 8bit,再量化为 16bit, $PSNR=46.764, C_q=0.48216$ 。

重采样:对信号重新采样为 22kHz,在重新变为 44.1kHz 时, $PSNR=25.064, C_q=0.5133$ 。



(a) 重新量化 (b) 重采样 (c) 有损压缩 (d) 噪声干扰

图 5 受攻击后提取的水印

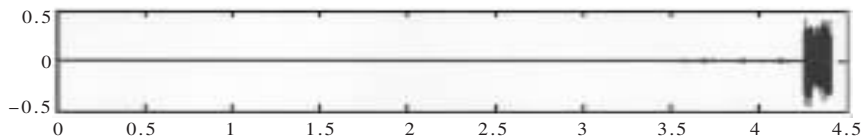


图 6 受重新采样攻击后的篡改定位图

有损压缩:对信号进行 5.5:1 比率压缩, $PSNR=7.122, C_q=0.50315$ 。

噪声干扰:对信号添加不同信噪比的高斯白噪声,实验表明,加入信噪比较低白噪声,对音频信号的影响不大,但脆弱水印仍可检测出已遭破坏。

从图 5(a)、(b)、(c)、(d)中可以看出,攻击后提取的水印已遭到严重破坏,无法辨认,具有良好的敏感性。图 6 为音频文件遭受重新采样时本算法的篡改定位图,图中可清晰看出音频受到了攻击。

本文提出了一种基于小波变换的数字音频脆弱水印算法,它能够有效地对音频信号真伪和完整性进行判别,嵌入水印采用了量化方法,实现了盲提取。仿真实验结果表明,此算法具有较好的不可闻性、脆弱性和安全性。

参考文献

- [1] 罗国祺. 含有脆弱水印的无损信息隐藏研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2005.
- [2] LIN E T, DELP E J. A review of fragile image watermarks[C]// Proc. Of ACM Multimedia & Security Workshop, Orlando, 1999:25-29.
- [3] MEERWALD P, UHL A. A survey of wavelet-domain watermarking algorithms[C] // WONG P W and DELP E J, eds. Proceedings of SPIE: electronic imaging, security and watermarking of multimedia contents III. San Jose, CA, USA:[s.n.] Jan. 2001:4314
- [4] 孙圣和,陆哲明,牛夏牧. 数字水印技术及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [5] 朱海峰,赵春晖,孙世国. 基于均值量化的多目的数字音频水印算法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2005, 26(5): 675-678.
- [6] 张新鹏,王朔中,张开文. 迭加与量化水印嵌入方案的比较及量化参数优化[J]. 光电子. 激光, 2003, 14(8): 858-861
- [7] 王炳锡,陈琦,邓峰森. 数字水印技术[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2003.
- [8] 飞思科技产品研发中心. 小波分析理论与 MATLAB7 实现[M]. 北京:电子工业出版社, 2005.
- [9] 郭越. 基于小波变换的鲁棒性与脆弱性数字水印算法的研究与实现[D]. 上海: 上海海事大学, 2004.

(收稿日期: 2006-10-11)