

一种抗剪切的 DWT 域多重音频数字水印算法 *

谢斌,肖玲玲,吴君钦

(江西理工大学 信息工程学院, 江西 赣州 341000)

摘要: 提出了一种能够抵抗剪切攻击的鲁棒性 DWT 域多重音频数字水印算法。该算法结合音频分帧技术及小波变换理论, 将置乱、降维处理后的不同彩色数字图像信息嵌入到宿主音频信号的低频小波系数中, 实现了多重彩色图像水印在宿主音频中的嵌入与提取。实验结果表明, 该算法不仅能够较好地抵抗常规攻击, 对剪切攻击也具有较强的鲁棒性, 即使是在受到强剪切攻击后仍然能够提取出较清晰的(多重)水印信号。

关键词: 剪切攻击; 多重音频水印; 离散小波变换; 鲁棒性

中图分类号: TP391.4

文献标识码: A

A multiple audio watermarking algorithm based on DWT against cropping

XIE Bin, XIAO Ling Ling, WU Jun Qin

(Faculty of Information Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

Abstract: A robust multiple audio watermarking algorithm based on DWT against cropping was proposed. The algorithm combines the audio sub-frame technology and the DWT theory embedded in the host audio signal in the low-frequency wavelet coefficients to different color images after scrambling and dimensional. The algorithm realization of a multi-color image in the host audio watermark embedding and extraction. The experimental results show that the multiple audio watermarking algorithm, in addition to better resistance to conventional attacks, attacks on the shear is relatively robust, even in the post-attack by the strong shear will still be able to extract a clearer definition of (multiple) watermark signal.

Key words: cropping attack; multiple audio watermarks; DWT; robust

数字水印技术以其较好的不易觉察性和鲁棒性等特点, 在信息隐藏、广播监视、所有者鉴别、隐蔽通信、操作跟踪等领域有着广泛的应用^[1]。随着研究的不断深入, 音频数字水印技术得到了水印研究者的重点关注^[2]。从已有的国内外音频数字水印相关文献来看, 绝大多数研究单一水印算法^[2-4]。单一水印在受到多种攻击时很难保证足够的鲁棒性, 并且在多著作权、不同阶段的版权认证及重要信息深层隐藏等方面已经不能满足人们的需要^[5]。多重数字水印技术则能够较好地解决上述问题, 该技术将多个功能不同、特性不同且可以在不同阶段显示出来的水印嵌入到同一个数字产品中, 能够有效地提高水印的安全性^[6]。但理论分析和实验结果表明, 现有的多重音频水印算法不同程度地存在如下几方面的问题: (1) 被嵌入的水印大多是随机序列或二值图

像, 其水印容量较小, 并且在实际应用中以彩色图像为主, 因此算法的适用性不高;(2)选取水印嵌入位置时, 没有充分考虑人类听觉系统特性, 易造成宿主音频的重要特性产生可感觉到的失真, 从而影响了算法的鲁棒性; (3)未能较好地处理前后水印的相互关系, 使得提取出来的不同水印性能上的差异较大, 效果不够理想。(4)算法的抗几何攻击性能相对较弱, 尤其是抗剪切攻击能力还有待提高。

针对上述问题, 本文利用音频分帧技术及小波变换理论, 结合人类听觉系统特性, 提出了一种能够抵抗剪切攻击的鲁棒性 DWT 域多重音频数字水印算法, 以包含丰富信息的不同彩色数字图像作为水印, 以常规数字音频信号作为水印载体, 进行了多重水印的嵌入、提取及攻击实验。实验结果表明, 该多重音频水印算法对剪切、有损压缩、高斯噪声、低通滤波及去噪等攻击均具有较强的鲁棒性。

* 基金项目: 江西省教育厅科学技术研究项目(赣教技字[2007]207号)

1 水印嵌入算法原理

人类的听觉系统比视觉系统更为敏感,多次嵌入较大容量的彩色水印极易造成音频文件的听觉质量下降。根据人耳听觉系统特性,人耳对声音的感受是在一定范围内的频率及声压级下进行^[1]。一方面,人耳对声音中、高频部分的变化比较敏感,而对声音低频部分的变化反应相对迟钝^[4];另一方面,对于弱音信号,其强度稍有增加人耳即可察觉,但是当声音强度增大到某一阈值后,即使再有较大的增加,人耳的感觉也无明显变化^[5]。另外,各种语音处理对信号高频部分产生损坏的可能性较大,水印在经历信号处理的过程中极易受损。因此,将多重水印信息嵌入到音频信号强度相对较大的低频分量中既可以保证算法的透明性,又能够有效地提高算法的鲁棒性。以二重水印为例,嵌入算法原理如图 1 所示。

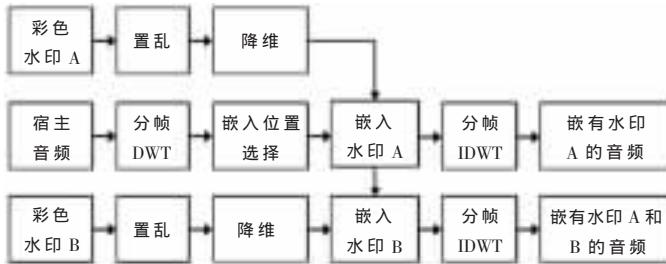


图 1 嵌入算法原理框图

(1)为了提高算法的抗攻击(尤其是剪切攻击)能力,水印嵌入前须进行置乱处理,以使可能的局部影响分布到整幅图像中,否则在遭受剪切攻击后,提取的水印图像会出现整块区域无法恢复的情况。本文选择 Fibonacci 变换对嵌入的不同彩色图像水印进行置乱。

(2)宿主音频通常是一维信号,而在 Matlab 中读取 $M \times N$ 大小的彩色图像 V ,得到 $M \times N \times 3$ 矩阵,因此需要对其进行降维处理,转变成一维序列后才可嵌入到一维的音频信号中,即:

$$V(\alpha) = V(i, j, k) \quad \left\{ \begin{array}{l} \alpha = i \times N \times 3 + j \times 3 + k \\ 0 \leq i < M, 0 \leq j < N, 0 \leq k < 3 \end{array} \right. \quad (1)$$

(3)设宿主音频信号 $U = \{u(\beta), 0 \leq \beta < L\}$,其中 L 是音频信号的采样点个数。将宿主音频信号分成 $X = M \times N \times 3$ 帧(假设 $X_A \geq X_B$),记为 W_α (其中 $0 \leq \alpha < X$),则每帧含 $Y = \frac{U}{M \times N \times 3}$ 个采样值。

(4)对分帧后的所有音频帧 W_α 分别进行 DWT 变换,得到对应帧的低频小波系数 $CL_\alpha(y_{max})$ (其中 $0 \leq m < Y$),从中选取绝对值最大的系数 $CL_\alpha(y_{max})$ 用于水印的嵌入。

(5)将水印 A 一维序列 $V_A(\alpha)$ 的数据依次嵌入到对应音频帧低频小波系数中绝对值最大的系数 $CL_\alpha(y_{max})$,即:

$$CL_\alpha(y_{max})_A = CL_\alpha(y_{max}) + \lambda V_A(\alpha) \quad (2)$$

式中, λ 为嵌入系数, $CL_\alpha(y_{max})_A$ 为 $CL_\alpha(y_{max})$ 嵌入水印 A 对应数据后的值。

(6)对此阶段所有音频帧的小波系数进行 IDWT 变换,重构生成“嵌有水印 A 的音频”,用于水印提取。

(7)接步骤(5),将水印 B 一维序列 $V_B(\alpha)$ 的数据依次嵌入到对应音频帧低频小波系数中绝对值第二大的系数 $CL_\alpha(y_{max2})$,即

$$CL_\alpha(y_{max2})_B = CL_\alpha(y_{max2}) + \lambda V_B(\alpha) \quad (3)$$

式中, $CL_\alpha(y_{max2})$ 为嵌入水印 B 对应数据后的值,然后对所有音频帧的小波系数进行 IDWT 变换,重构生成“嵌有水印 A 和 B 的音频”。

2 水印提取算法原理

多重水印的提取应先提取后嵌入的水印,再提取之前嵌入的水印。仍以上述二重水印为例,提取算法原理如图 2 所示。

(1)对“嵌有水印 A 和 B 的音频”、“嵌有水印 A 的音频”及“宿主音频”分别进行 DWT 变换,得到各自对应的小波系数 $C_{AB}(x_\alpha)$ 、 $C_A(x_\alpha)$ 及 $C(x_\alpha)$ 。

(2)提取水印 B 数据 $C_{VB}(\alpha)$,方法为:若 $C_{AB}(x_\alpha) = 0$,则 $C_{VB}(\alpha) = 0$;若 $C_{AB}(x_\alpha) \neq 0$,则

$$C_{VB}(\alpha) = \frac{C_{AB}(x_\alpha) - C_A(x_\alpha)}{\lambda} \quad (4)$$

(3)对 $C_{VB}(\alpha)$ 序列进行升维及逆置乱处理(逆 Fibonacci 变换),经过重构即可得到彩色水印 B 的图像。

(4) $C_{AB-B}(x_\alpha)$ 与 $C_{VB}(\alpha)$ 相减,得到去除水印 B 后含水印 A 的混合数据 $C_{AB-B}(x_\alpha)$,即:

$$C_{AB-B}(x_\alpha) = C_{AB}(x_\alpha) - C_{VB}(\alpha) \quad (5)$$

(5)提取水印 A 数据 $C_{VA}(\alpha)$,即:

$$C_{VA}(\alpha) = \frac{C_{AB-B}(x_\alpha) - C(x_\alpha)}{\lambda} \quad (6)$$

(6)对 $C_{VA}(\alpha)$ 序列进行升维及逆置乱(逆 Fibonacci 变换)处理,经过重构即可得到彩色水印 A 的图像。

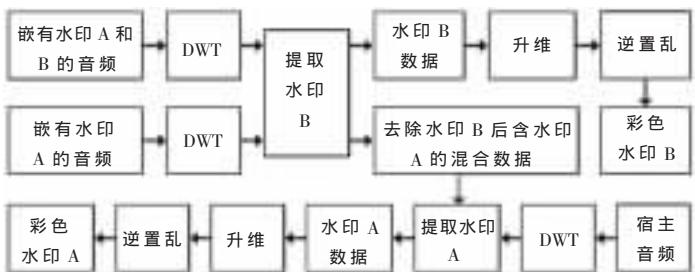


图 2 提取算法原理框图

3 仿真实验

在仿真实验中,采用的水印载体(宿主)为 44.1 kHz/16 bit 的音频信号,时间为 12 s,如图 3(a)所示。水印 A 、水印 B 分别为 100 bit \times 100 bit \times 8 bit 和 82 bit \times 82 bit \times 8 bit 的彩色图像,如图 3(b)、(c)所示。图 4(a)为嵌入水印 A 、水印 B 后得到的音频信号,其各方面性能与原始宿主音

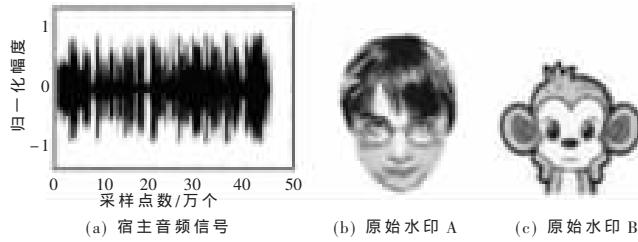


图 3 原始宿主音频及水印信号

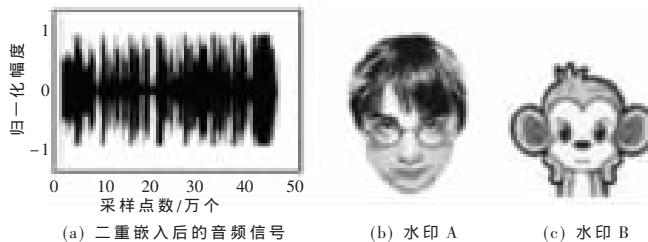


图 4 嵌入两个水印后的音频及正常提取出的水印

频信号一致性较高,人耳很难觉察出二者的区别。图 4(b)、(c)分别为正常提取的水印 A 和水印 B,其与原始水印的相似度分别为 0.9905 和 0.9986,说明算法提取效果较好。

对图 4(a)所示含有 2 个水印的音频信号进行剪切攻击实验,剪切起始位置任意设为第 10 万个采样点。图 5 为 5% 剪切后的音频信号及提取的水印 A、水印 B(水印相似度分别为 0.8419 和 0.8671)。图 6 为 10% 剪切后的音频信号及提取的水印 A、水印 B(水印相似度分别为 0.7916 和 0.8051)。图 7 为 33.3% 剪切后的音频及提取的水印 A、水印 B(水印相似度分别为 0.7103 和 0.7227)。虽然经过不同程度的剪切攻击,但提取出的水印与原始水印的相似度仍然保持较高水平(甚至在 60% 剪切攻击下还能够有效识别提取水印的内容),说明该算法对剪切攻击有较好的鲁棒性。

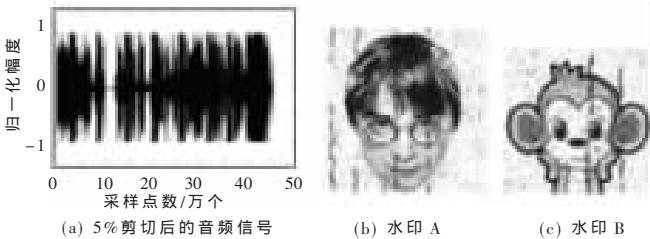


图 5 5% 剪切攻击后的音频及提取出的水印

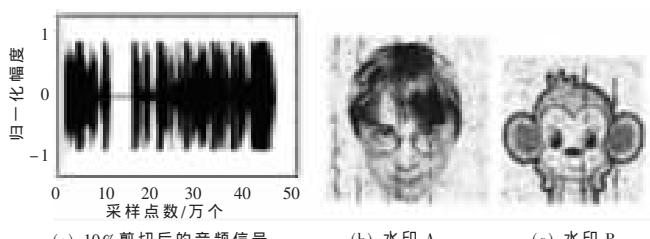


图 6 10% 剪切攻击后的音频及提取出的水印

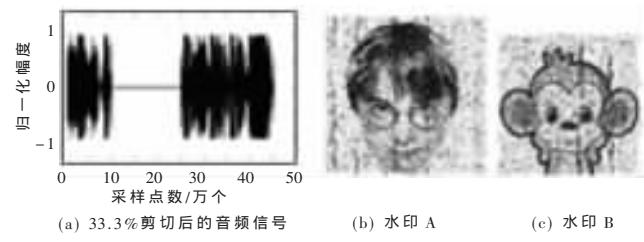


图 7 33.3% 剪切攻击后的音频及提取出的水印

为了证明算法的鲁棒性,另外还进行了有损压缩、高斯噪声、低通滤波及去噪等攻击实验,结果如表 1 所示。经过各类常规攻击后,提取出的不同水印在质量上的差异较小,并且与原始水印的相似度较高。另外,后嵌入的水印提取效果要优于先嵌入水印的提取效果,这是因为后嵌入的水印经过信号处理的次数要少于前者。实验结果表明,该多重音频水印算法对上述常规攻击均表现出了较好的鲁棒性。

表 1 各类攻击下提取水印与原水印的相似度

相似度	有损压缩	高斯噪声	低通滤波	去噪
水印 A	0.8771	0.9139	0.9031	0.8827
水印 B	0.8913	0.9297	0.9226	0.9015

本文针对现有多重音频水印算法的一些不足,结合人耳听觉特性,提出了一种能够抵抗剪切攻击的鲁棒性 DWT 域多重音频数字水印算法,将重要信息嵌入到音频信号低频分量中强度相对较大的部分,较好地实现了不同彩色数字图像信息在宿主音频信号中的多重嵌入及提取。仿真实验结果表明,该算法不仅能够抵抗诸如有损压缩、高斯噪声及低通滤波等常规攻击,对剪切攻击也有较好的鲁棒性。另外,该算法还具有计算量小、嵌入速度快及提取效果好等特点,在音频作品的版权保护和重要信息深层隐藏等方面具有一定的应用价值。

参考文献

- [1] NAKAYAMA A, LU Jin Lin, NAKAMURA S. Digital watermarks for audio signal based on psychoacoustic masking model[J]. Electronics and Communications in Japan: Part 3(Fundamental Electronic Science), 2003, 86(12):65–75.
- [2] KIROVSKI D, MALVAR H. Spread-spectrum watermarking of audio signals[J]. IEEE Trans on Signal Processing: Special Issue on Date Hiding, 2002:1–25.
- [3] 马翼平, 韩纪庆. 基于能量特性分块的 DCT 域自适应音频水印算法[J]. 信号处理, 2006, 22(4):519–522.
- [4] LI Wei, XUE Xing Yang. Content based localized robust audio watermarking robust against time scale modification [J]. IEEE Transactions On Multimedia, 2006, 8(1):60–69.
- [5] PETER H, WONG W, OSCCAR C A. A blind water

marking technique for multiple watermarks[C]. ISCAS '03,
2003,2:25–28.

- [6] 王让定,徐达文. 基于提升小波的多重数字音频水印
[J]. 电子与信息学报, 2006,28(10):1820–1826.

(收稿日期:2009-11-13)

作者简介:

谢斌,男,1977年生,硕士,讲师,主要研究方向:信号处理与信息安全。

肖玲玲,男,1960年生,硕士,副教授,硕士生导师,主要研究方向:语音信号处理。

吴君钦,男,1966年生,硕士,副教授,硕士生导师,主要研究方向:信息安全。