

一种基于数字全息技术的盲音频水印算法

刘 薇^{1,2} 顾济华^{1,2*} 尉迟亮^{1,2} 陶 智^{1,2}

(1 苏州大学物理科学与技术学院, 苏州 215006)

(2 江苏省现代光学技术重点实验室, 苏州 215006)

摘 要 提出了一种基于数字全息技术的盲音频水印算法. 水印图像经随机相位调制形成物光波, 该物光波的傅里叶变换与参考光波发生干涉, 形成傅里叶变换全息图. 再利用离散余弦变换的能量压缩能力, 通过量化算法把降维的水印, 即傅里叶变换全息图嵌入音频信号中, 在水印提取过程中不需要原始音频信号的参与. 仿真实验表明, 该算法对低通滤波、噪音干扰特别是剪裁具有一定的稳健性.

关键词 数字全息; 音频水印; 离散余弦变换; 量化; 剪裁

中图分类号 O438.1 **文献标识码** A

0 引言

近年来, 随着计算机多媒体技术的迅猛发展以及网络的逐渐普及, 信息的发布和传输较以往任何时候都更为容易, 但这也导致了数字信息的传输及数字产品版权等问题的日益严重. 数字水印的出现为以上提到的问题提供了很好的解决方法^[1,2]. 同时随着数字音频的广泛使用, 音频水印正逐渐成为数字水印中的一个重要研究方向. 由于人的听觉系统(HAS)要比视觉系统(HVS)更加敏感, 使得音频水印的研究具有很大的挑战性. 由于音频信号是时间轴上的函数, 考虑到各种攻击, 比如对音频的剪裁、无线传输中的信号丢失、IP 网络中的丢包等现象^[3], 使得有必要加强音频水印系统在这方面的抗攻击能力.

本文在文献[4]的基础上提出了一种基于数字全息技术的数字音频水印算法, 就是基于全息图的任何一部分都包含有整个物体信息的原理^[5], 将所要嵌入的水印以傅里叶变换全息图的形式嵌入到音频信号中, 包含有这种水印形式的音频信号在经过剪裁等攻击后, 仍能获取原始信号. 由于嵌入的水

印是灰度图, 增加了嵌入的信息量. 同时为了使嵌入的水印达到较好的不可感知性和鲁棒性, 利用改变音频信号的 DCT 频域中频系数的方法^[6]来隐藏水印, 同时在水印的嵌入过程中采用量化方案, 在水印的提取过程中不需要原始音频信号的参与, 实现了盲水印信号的提取. 仿真实验证明了该算法具有一定的鲁棒性和抗剪裁能力.

1 数字全息

数字全息是指全息图的记录、处理和再现等各个环节完全实现数字化操作的一种全息技术^[7,8]. 一般包含两方面的含义, 一是指用 CCD 等数字化记录装置记录全息图^[9,10], 二是指全息图的再现是直接利用数字计算的方法或将全息图转移到数字介质上以光照形式实现. 本文中的数字全息是指用计算机图像处理的方法, 根据传统傅里叶光学原理来生成和再现图像.

1.1 数字全息图的记录

通过计算机模拟, 水印图像以傅里叶变换全息图的形式记录. 具体框图如图 1.

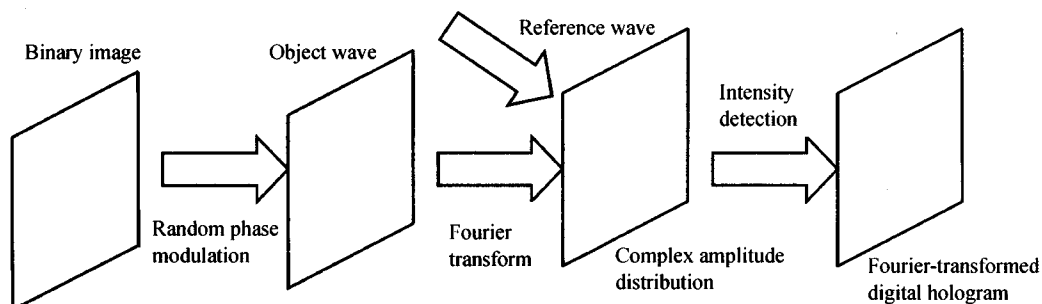


图 1 傅里叶变换全息图的形成框图

Fig. 1 Procedure for making a digital hologram

物光波的振幅由一幅二值图像 $g_{\text{mark}}(x, y)$ 给出, 相位为 $\exp[j\phi(x, y)]$, 其中 $\phi(x, y)$ 是一个二维

* Tel: 0512-65112784 Email: jhgu@suda.edu.cn
收稿日期: 2005-05-30

零均值,一定方差的高斯随机噪音,其复振幅表示为

$$g_0(x, y) = g_{\text{mark}}(x, y) \exp [j\phi(x, y)] \quad (1)$$

式(1)的傅里叶变换为

$$G_{\text{mark}}(\xi, \eta) = \iint g_0(x, y) \exp [-2\pi j(\xi x + \eta y)] dx dy \quad (2)$$

利用倾斜入射的平面波作参考光波,平面波表示为

$$R(\xi, \eta) = R_0 \exp [2\pi j(a\xi + b\eta)] \quad (3)$$

式中 a, b 表示平面波前的空间频率. 根据傅里叶光学原理,在记录面记录到的总光强为

$$H_1(\xi, \eta) = |G_{\text{mark}}(\xi, \eta) + R(\xi, \eta)|^2 = |G_{\text{mark}}(\xi, \eta)|^2 + |R(\xi, \eta)|^2 + G_{\text{mark}}^*(\xi, \eta) \cdot R(\xi, \eta) + G_{\text{mark}}(\xi, \eta) R^*(\xi, \eta) \quad (4)$$

其中前两项是偏置项,基本上是常量,对全息图重现没有用处,可以略去不计. 因此,在记录面记录到的包括物光波傅里叶变换光场振幅和相位信息的全息图可以表示为

$$H(\xi, \eta) = G_{\text{mark}}^*(\xi, \eta) R(\xi, \eta) + G_{\text{mark}}(\xi, \eta) R^*(\xi, \eta) \quad (5)$$

1.2 数字全息图的再现

根据傅里叶光学原理,当用一束参考光照明傅里叶变换全息图时,可以得到原物光波的傅里叶变换,经过一次逆傅里叶变换可得到原始的物光波. 参考光波

$$S(\xi, \eta) = |S(\xi, \eta)| \exp [j\phi_s(\xi, \eta)] \quad (6)$$

为了简单起见,可以设 $|S(\xi, \eta)| = 1, \phi_s(\xi, \eta) = 0$, 因此,重现的图像为式(5)的逆傅里叶变换

$$g_R(x, y) = \iint H(\xi, \eta) \exp [2\pi j(\xi x + \eta y)] d\xi d\eta \quad (7)$$

将式(2), (3), (5)代入式(7)可得

$$g_R(x, y) = g_0(x-a, y-b) + g_0^*[-(x+a) - (y+b)] \quad (8)$$

因为 $g_{\text{mark}}(x, y)$ 是二值图像,因此式(8)的模值为

$$|g_R(x, y)|^2 = |g_0(x-a, y-b)|^2 + |g_0^*[-(x+a), -(y+b)]|^2 = |g_{\text{mark}}(x-a, y-b)|^2 + |g_{\text{mark}}[-(x+a), -(y+b)]|^2$$

由此可以获取再现像幅度,与随机相位 $\exp [j\phi(x, y)]$ 无关. 适当调节空间频率 a 和 b 的值可以改变实像和虚像的相对位置,它们是关于中心对称的.

2 采用 DCT 域量化算法嵌入水印

2.1 双极性系数量化算法

为了达到盲水印信号的提取,在嵌入水印时采用量化算法,因为音频信号有正有负,故采用双极性系数量化算法^[11].

首先按照量化步长 Δ 将坐标轴分割成许多相邻的 A 区间集和 B 区间集,定义凡属于 A 区间集

的坐标都代表二进制数 1,属于 B 区间集的坐标都代表二进制数 0. 根据水印信息 w 和待量化的系数 f 所在的区间集对 f 进行量化处理:当 $w=1$ 时,量化结果 f' 为与 f 最接近的 A 区间集中某一区间的中间坐标值;当 $w=0$ 时,使 f' 为与 f 最接近的 B 区间集中某一区间的中间坐标值.

2.2 基于数字音频信号 DCT 域水印嵌入算法

设 A 是含有 L 个采样数据的原始数字音频信号, $A = \{a(l), 0 \leq l \leq L\}$, 其中 $a(l) \in \{0, 1, 2, \dots, (2^p - 1)\}$ 是第 l 个数据的幅值, p 为表示每个数据所用的位数. 这里所嵌入的水印是上面所述计算机模拟的全息图像 $H, H = \{h(i, j), 0 \leq i < M_1, 0 \leq j < M_2\}$, 这是一幅大小为 $M_1 \times M_2$, 灰度级为 2^T 的灰度图像. 为了采用量化算法嵌入该灰度图像,这里还采用了二值化分解^[12]即位分解的方法,将每一个灰度值 $h(i, j)$ 分解成 T 位 0 或 1 的序列 $\{h'(i, j) \in \{0, 1\}, t = 0, 1 \dots T-1\}$, 灰度值合成可以表示为 $h(i, j) = \sum_{t=0}^{T-1} h'(i, j) \times 2^t$

本文采用对音频信号分段的方法嵌入水印,假设每个音频数据段长度为 N , 每个音频数据段中嵌入水印 H 的一个像素信息,因为这里一个像素是由 T 位 0 或 1 的数据组成,因此原始数字音频总的数据 L 应该满足如下的关系 $L \geq (M_1 \times M_2) \times N$, 同时音频数据段 N 应满足 $N > T$.

嵌入算法如下:

1) 将原始音频信号划分出 $M_1 \times M_2$ 个互不相交、长度为 N 的数据段,则第 k 个数据段可以表示为

$$A_c(k) = \{a(k \times N + i), 0 \leq i < N\}$$

2) 要将二维灰度图像嵌入到一维音频信号中,必须对水印,即傅里叶全息图 H 降维,转换成一维信号,即

$$V = \{v(k) = h(i, j), 0 \leq i < M_1, 0 \leq j < M_2, k = i \times M_2 + j\}$$

3) 对 A_c 进行一维离散余弦变换(DCT):

$$D_c(k) = \text{DCT}(A_c(k)), 0 \leq k < (M_1 \times M_2)$$

4) 由于嵌入的水印信息是灰度图,由 T 位数据组成. 因此在 $A_c(k)$ 的离散余弦变换的结果 $D_c(k)(i), i = 1, 2, \dots, N$ 中选用 T 位中频系数 $D_c(k)(t), t \leq N$, 嵌入 V 中第 k 个元素 $v(k)$.

$v(k)$ 是降维后第 k 个灰度级为 2^T 的水印信号,采用二值化分解, $v(k)$ 由 T 位 0 或 1 的序列表示,即 $v(k) = \sum_{t=0}^{T-1} v'(k) \times 2^t$. 根据 2.1 所描述的量化算法,如果 $v(k)$ 中水印序列第 t 位数值 $v'(k) = 1$, 则 $D_c(k)(t) \in A$, 反之,如果 $v(k)$ 第 t 位数值 $v'(k) =$

0, 则 $D'_e(k)(t) \in B$. 经过量化处理后的结果为 $D'_e(k)$, 由于每段音频数据要量化 T 位数据, 数据量比较大, 为了增强水印嵌入的不可感知性, 要尽可能减小量化步长 Δ , 同时加大 N 的取值, 来减小对原始音频水印的影响.

5) 经过量化算法后含有水印信息的 DCT 变换系数 $D'_e(k)$ 代替 $D_e(k)$, 再进行逆离散余弦变换后得到的含水印的数字音频信号 A'_e 将最终代替 A_e .

2.3 数字音频信号的抽取水印算法

从包含数字水印的音频信号 A'_e 中提取水印信息时, 按照 2.2 中所描述的分段规则对含水印的数字音频信号进行分段处理, 对每一段音频数据进行离散余弦变换, 抽取出水印信息. 由于原始水印是二维傅里叶全息图, 因此要对抽取的水印序列进行升维处理, 最后对抽取的二维傅里叶全息图进行逆傅里叶变换后, 即能得到原始物光波前.

2.4 水印的评价

为了有一个客观的评价, 在此利用峰值信噪比对原始水印和抽取的水印的相似性作客观评价, 峰值信噪比定义为

$$\text{PSNR} = 10 \times \lg \frac{(M_1 \times M_2) \times (\text{Max}_{v,i,j} w(i,j))^2}{\sum_{i=1}^{M_1} \sum_{j=1}^{M_2} (w(i,j) - w_s(i,j))^2}$$

3 仿真实验

在实验中, 采用 8 位 22.05k/s 采样率的数字音频信号作为原始信号, 其波形如图 2(a), 嵌入水印后的音频信号为图 2(b). 采用 64×64 的二值图像作为物光波振幅, 如图 3(a), 它的傅里叶变换全息图为图 3(b), 再现像为图 3(c), 可以看到再现像中实像和虚像关于中心对称.

在水印嵌入过程中, 音频数据段的长度 N 为 32, 即每 32 个音频数据中嵌入一个全息图的像素信息. 这里全息图是一个二维 256 灰度级的灰度图, 将它二值化后就是一个 8 位的序列, 因此每段音频数据段中取出 8 位分别嵌入这 8 个 0,1 序列. 为了加强水印的不可感知性和鲁棒性, 选取音频数据段的 DCT 的中频系数嵌入. 嵌入过程中的量化步长为 0.01, 嵌入全息图后的音频如图 2(b), 峰值信噪比 $\text{PSNR} = 45.308 \text{ dB}$.

为了检测算法的稳健性, 对含水印的音频信号进行如下处理: 1) 加入高斯白噪音, 均值为 0, 方差为 0.003; 2) 低通滤波, 取阶数为 5, 截止频率为 35 kHz 的巴特沃斯低通滤波器. 在这两种情况下提取的水印图 4(a)、4(b), 未受任何攻击后提取的水印图如图 4(c). 其峰值信噪比分别为 18.893 dB, 14.474 dB

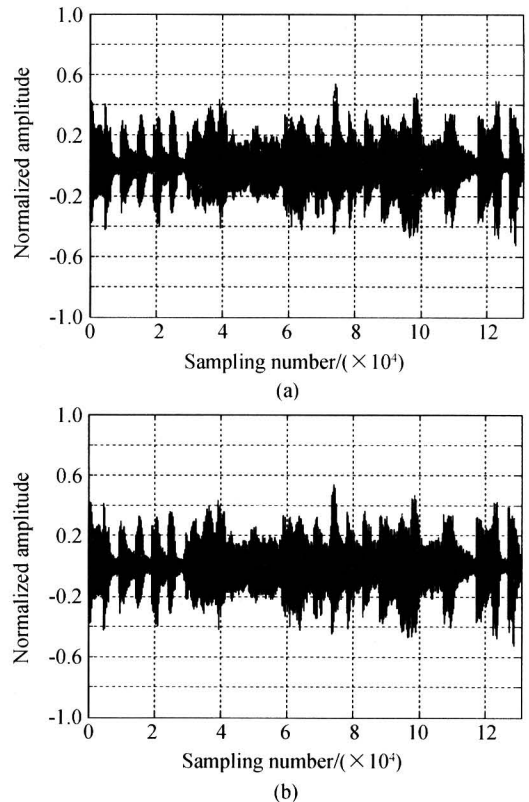


图 2 (a) 原始音频信号, (b) 含水印音频信号

Fig. 2 (a) Original audio signal, (b) Watermarked audio signal

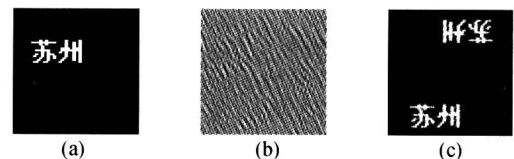


图 3 分别为 (a) 物光波振幅, (b) 傅里叶变换全息图, (c) 再现原始像和共轭像

Fig. 3 (a) amplitude of object wave, (b) Fourier-transformed digital hologram, (c) Reconstruction image

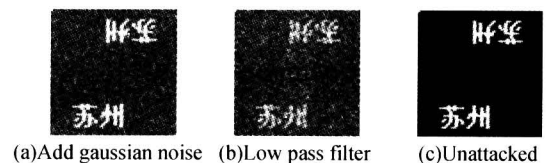


图 4 分别在三种情况下提取的水印

Fig. 4 Retrieved watermark under three conditions

37.473 dB.

需要特别说明的是, 为了验证该算法抗剪裁的鲁棒性, 将含水印的音频信号剪去一段, 剪裁后所剩的百分比分别为 90%, 70%, 50%, 30%. 同时将本文所用的方法与传统的直接嵌入二值水印的方法做比较, 采用相同的嵌入算法, 由于二值水印的嵌入信息量比灰度图少, 可以采用伪随机排序和适当增加量化步长 Δ 来提高嵌入水印的鲁棒性. 剪裁实验比较的结果如图 5、6, 可以看出本文所用的方法对剪裁攻击具有更强的鲁棒性, 当剪裁量达到 70% 时

还能分辨出嵌入的水印. 峰值信噪比 PSNR 的比较如表 1.

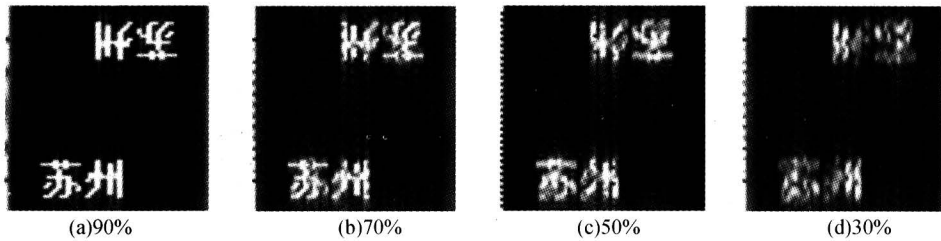


图 5 本文所采用的算法经剪裁后提取的水印图

Fig. 5 Retrieved watermark by the holographic technique after cropping

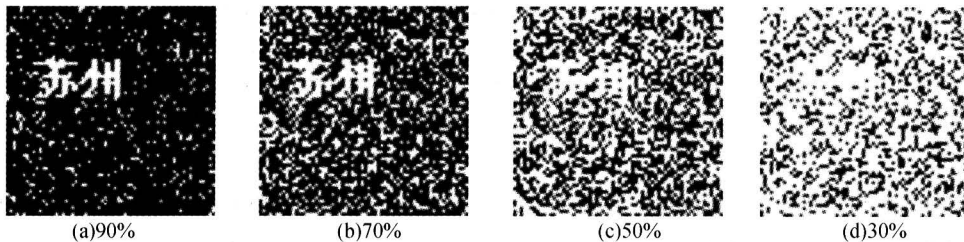


图 6 直接嵌入二值水印经剪裁后提取的水印图

Fig. 6 Retrieved watermark by embedding binary image after cropping

表 1 相同算法下采用不同的嵌入技术提取的水印的峰值信噪比 PSNR 的比较(单位: dB)

算法	剪裁 10%	剪裁 30%	剪裁 50%	剪裁 70%
基于全息技术嵌入水印	15.611	11.243	9.3291	7.4813
传统的嵌入二值水印	16.251	10.951	8.9386	7.0531

从实验结果可以看出,以数字全息图形式嵌入的水印对加噪、滤波特别是剪裁具有一定的抗攻击能力. 由于采用量化算法,具有一定的量化误差,但是比较原始未受攻击的再现像与受攻击的数字音频信号中抽取的水印,可以看出它们在视觉上有一定的相似性,因此利用该方法可以对数字音频信号的版权归属做出结论.

4 结论

本文讨论了基于数字全息技术的盲音频水印嵌入算法. 该算法提出了一种新的水印嵌入形式,嵌入全息图形式的水印,增加了嵌入的信息量. 同时利用离散余弦变换的能量压缩和解相关能力,提高水印嵌入的鲁棒性和不可感知性. 同时在嵌入过程中采取了量化算法,提取水印时不需要原始音频信号的参与,便于实际工程应用. 仿真实验证明该算法具有一定的抗噪音、滤波特别是剪裁的能力.

参考文献

- 1 孙圣和,陆哲明. 数字水印处理技术. 电子学报,2000, **28**(8):85~90
Sun S H, Lu Z M. *Acta Electronica Sinica*, 2000, **28**(8):85~90
- 2 许艳杰,许录平. 一种基于图像融合的数字水印方法. 光子学报,2002,**31**(6):739~742

- Xu Y J, Xu L P. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(6): 739~742
- 3 吴绍权,黄继武,黄达人. 基于小波变换的自同步音频水印算法. 计算机学报,2004,**27**(3):365~370
Wu S Q, Huang J W, Huang D R. *Chinese Journal of Computers*, 2004, **27**(3):365~370
- 4 Nobukatsu Takai, Yuto Mifune. Digital watermarking by a holographic technique. *Appl Opt*, 2002, **41**(5):865~873
- 5 苏显渝,李继陶. 信息光学. 北京:科学出版社, 1999. 111~117
Su X Y, Li J T. *Information Optics*. Beijing: Science Press. 1999. 111~117
- 6 赵春晖,李福昌. 一种 DWT 与 DCT 结合的盲音频水印算法. 电子与信息学报,2003,**25**(11):1570~1574
Zhao C H, Li F C. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2003, **25**(11):1570~1574
- 7 Enrique Tajahuerce, Bahram Javidi. Optical techniques for three-dimensional image recognition. *Proc. of SPIE*, 2001, **4387**:41~51
- 8 Enrique Tajahuerce, Bahram Javidi. Shift-invariant three dimensional object recognition by means of digital holography. *Applied Optics*, 2001, **40**(23):3877~3886
- 9 刘诚,刘志刚,薄峰,等. 数字全息中再现像分离问题的研究. 光子学报,2003,**32**(5):588~591
Liu C, Liu Z G, Bo F, et al. *Acta Photonica Sinica*,

- 2003, **32**(5):588~591
- 10 张莉, 国承山, 荣振宇, 等. 同轴相移数字全息中相移角的选取及相移误差的消除. 光子学报, 2004, **33**(3):353~356
Zhang L, Guo C S, Rong Z Y, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(3):353~356
- 11 王秋生, 孙圣和. 基于量化数字音频信号频域参量的水印嵌入算法. 声学学报, 2002, **27**(4):279~385
Wang Q S, Sun S H. *Acta Acustica*, 2002, **27**(4):279~385
- 12 宿富林, 马国强, 李明江. 一种新的图像灰度数字水印嵌入算法. 系统工程与电子技术, 2001, **23**(8):88~91
Su F L, Ma G Q, Li M J. *Systems Engineering and Electronics*, 2001, **23**(8):88~91

A Blind Audio Watermark Algorithm by a Holographic Technique

Liu Wei^{1,2}, Gu Jihua^{1,2}, Yu Chiliang^{1,2}, Tao Zhi^{1,2}

¹ Physics Department, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006

² Key Lab of Modern Optical Engineering of Jiangsu Province, Suzhou 215006

Received date: 2005-05-30

Abstract A blind audio watermark embedding algorithm by a holographic technique was proposed. The digital-watermark image to be hidden was phase modulated in a random wise in order to form the object wave. The Fourier transform of the object wave was interfered with the reference wave to form the Fourier-transformed digital hologram. It made full use of the energy compression of DCT (Discrete Cosine Transform) to embed the watermark, in the form of Fourier-transformed digital hologram, into the audio signal by quantification process. The watermark can be extracted without the original audio signal. The process of constructing and reconstructing a digital hologram were described on the basis of the theory of Fourier optics and simulated by the computer. Experimental results show that the algorithm was robust against common signal manipulations and attacks, such as Gaussian noise, low pass filter and cropping especially.

Keywords Digital hologram; Audio watermarking; DCT; Quantification; Cropping



Liu Wei was born in Jan, 1981. She received the B. S. degree of Information Engineering, Soochow University, Suzhou China, in 2003. In the same year she continued her education toward Master's degree in the same university. Her current research interests are optical information processing and digital watermark.