

基于相位恢复和数字全息的水印

陈大庆, 顾济华[†], 陶智

(苏州大学 a. 物理科学与技术学院; b. 江苏省现代光学技术重点实验室, 江苏 苏州 215006)

摘 要:提出了一种在数字全息技术中引入相位恢复算法的音频水印方法. 用水印图像经相位恢复处理形成虚拟物光波与参考光波干涉, 得到高对比度的傅里叶变换全息图. 利用量化算法和离散余弦变换把数字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, 并且采用密钥加强了水印的安全性. 数值计算实验表明: 该算法对有损压缩、重采样、低通滤波、噪音干扰等常用音频信号攻击均具有很好的稳健性.

关键词:信息光学; 数字全息; 相位恢复; 音频水印; 离散余弦变换

中图分类号: O438

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2009)12-3333-5

0 引言

基于光学理论与方法的数字水印技术是近年来开始起步发展的新一代信息安全理论与技术^[1-8]. 在完成数据加密或信息隐藏的过程中, 基于光学理论与方法的数字水印可以通过计算光的干涉、衍射、滤波、成像、全息等过程, 对涉及的波长、焦距、振幅、光强、相位、偏振态、空间频率及光学元件的参量等进行多维编码, 具有多维、大容量、高设计自由度、高鲁棒性等优势.

近年来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^[8-9, 11]. 由于人类听觉系统极为灵敏, 使得音频水印的研究具有极大的挑战性. 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、因特网中的丢包等现象, 使得有必要加强音频水印系统在这方面的抗攻击能力, 需要获得具有更高隐蔽性和良好稳健性的水印. 文献[8]由光学理论提出了一种基于数字全息技术的盲音频水印算法, 对低通滤波、噪音干扰特别是剪裁具有一定的稳健性. 本文在文献[1]和文献[8]的基础上提出了一种新的基于相位恢复和数字全息技术的数字音频水印算法, 使水印具有更好的鲁棒性. 水印图像经相位恢复处理形成虚拟物光波, 该物光波与参考光波发生干涉, 形成傅里叶变换全息图. 利用伪随机序列对水印进行加密, 利用量化方案在离散余弦变换(Discrete Cosine Transform, DCT)频域低频系数来隐藏水印, 实现了盲水印信号的提取. 数值计算实验证明了改进后的方法, 水印的稳健性有了很大的提高.

1 基于相位恢复和数字全息的水印处理

1.1 水印的相位恢复算法

相位恢复计算^[1]的框图如图 1. 其中 $G(\xi, \eta)$ 和 $f(x, y)$ 分别为频谱空间和相对应的像空间的复振幅分布, $G(\xi, \eta)$ 表示与期望的输入振幅分布 $f(x, y)$ 对应的复振幅. 首先对 $w(x, y)$ 乘以一个可随机选取的初始相位作为问题的第一个试探解. 对复振幅 $f(x, y)$ 进行傅里叶变换得到频谱 $G'(\xi, \eta)$, 为了得到全息干涉中所需要的纯位相波前, 在输出面引入频域限制条件: 把复振幅 $G'(\xi, \eta)$ 仅保留位相, 其振幅强制为 1, 所以迭代过程中 $C(\xi, \eta)$ 为 1, $G(\xi, \eta)$ 为纯位相. 频谱 $G(\xi, \eta)$ 做逆傅里叶变换得到 $f'(x, y)$, 运用输入面加工约束条件: 把复振幅 $f'(x, y)$ 的振幅用 $w(x, y)$ 代替形成新的 $f(x, y)$ 进入下次循环. 重复上述过程一直到 $f(x, y)$ 与期望值的差异小于某一特定值为止, 迭代结束后得到的最佳的相位分布为 $G(\xi, \eta)$. 设水印信号为 $w(x, y)$, 则相位恢复计算可表示为

$$\begin{aligned} & \iint G(\xi, \eta) \exp[2\pi i(\xi x + \eta y)] d\xi d\eta = \\ & w(x, y) \exp[i\phi(x, y)] \end{aligned} \quad (1)$$

式(1)表明, $G(\xi, \eta)$ 为原始水印 $w(x, y)$ 的傅立叶变换谱, 因此可替换文献[8]的傅里叶变换全息物光波.

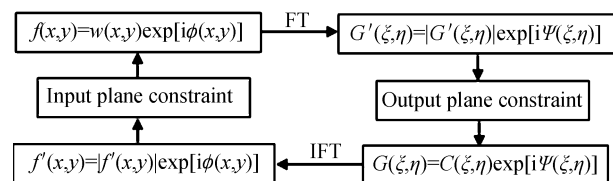


图 1 相位恢复原理

Fig. 1 Schematic illustration of phase retrieval algorithm

[†] Tel: 13862597312

Email: jhgu@suda.edu.cn

收稿日期: 2008-06-23

修回日期: 2008-12-15

1.2 相位恢复数字全息图的记录

记录过程如图 2, 其中物光波复振幅采用由相位恢复计算得到的 $G(\xi, \eta)$, 此复振幅代表虚拟物光波. 设参考光波的表达式为

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

式中 a, b 是空间频率.

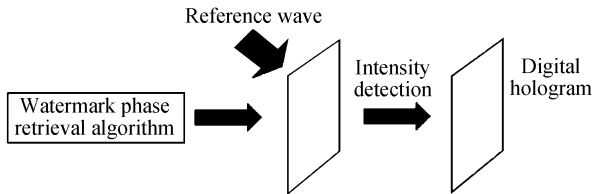


图 2 相位恢复全息图的形成框图

Fig. 2 Procedure for making a phase retrieval digital hologram

全息面上的强度分布可表示为

$$H(\xi, \eta) = |G(\xi, \eta)|^2 + R_0^2 + G^*(\xi, \eta)R_0 \cdot \exp[2\pi i(a\xi + b\eta)] + G(\xi, \eta)R_0 \cdot \exp[-2\pi i(a\xi + b\eta)] \quad (3)$$

式(3)中第一、二项为傅里叶变换全息图的晕轮光和中心亮点, 对再现像的质量有很大的影响, 数字水印处理时应予以去除

$$H(\xi, \eta) = G^*(\xi, \eta)R_0 \exp[2\pi i(a\xi + b\eta)] + G(\xi, \eta)R_0 \exp[-2\pi i(a\xi + b\eta)] \quad (4)$$

式(4)便是通过相位恢复和全息技术将水印信号转化成的傅里叶变换全息图. 根据信息光学理论, 当物光波和参考光的光强分别为 I_0 和 I_R 时, 其干涉图的对比如为 $2\sqrt{I_R I_0}/(I_R + I_0)$. 式(4)中物光波 $G(\xi, \eta)$ 是纯相位, 所以物光强 $I_0 = 1$, 参考光选取单位振幅平行光时, 参考光光强 $I_R = 1$, 因此式(4)的全息图理论对比度为 100%, 即相位恢复得到的全息图具有很高的对比度.

1.3 相位恢复数字全息图的再现

全息图的数字再现是用照明光的数学表达式和全息图相乘, 并进行傅里叶逆变换以获得再现像的光场强度分布, 设照明光波为 $S(\xi, \eta) = |S(\xi, \eta)| \cdot \exp[i\phi(\xi, \eta)]$, 最简单的情形为 $|S(\xi, \eta)| = 1, \phi(\xi, \eta) = 0$, 在这种情况下再现图像的复振幅为

$$g_R(x, y) = \iint H(\xi, \eta) \exp[2\pi i(\xi x + \eta y)] d\xi d\eta \quad (5)$$

将式(4)代入式(5), 利用式(1), 并取 $R_0 = 1$ 可得

$$|g_R(x, y)|^2 = |w(x-a, y-b)|^2 + |w^*[-(x+a), -(y+b)]|^2 \quad (6)$$

式(6)表明, 原始像和共轭像同时出现在再现平面上, 中心分别为 $(a, b), (-a, -b)$, 适当的选择参量 a, b 可以调节两个像的位置, 再现过程如图 3.

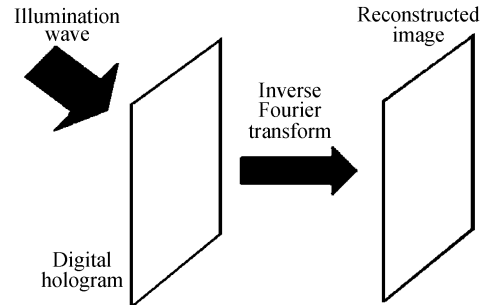


图 3 傅里叶变换全息图再现

Fig. 3 Reconstruction process of Fourier transform hologram

2 数字音频水印的嵌入

2.1 数字音频信号的分段处理

本文采用对数字音频信号分段的方法嵌入水印. 设全息图水印信息为 $M_1 \times M_2$ 的灰度图, 其中 M_1 和 M_2 分别为图像的长和宽, 单位为像素. 在原始数字音频信号中划分出 $M_1 \times M_2$ 个互不相交的、长度位 N 的数据段, 每个数据段中嵌入水印的一个像素, 这些数据段可表示为

$$A = \{A(k), 0 \leq k < M_1 \times M_2\} \quad (7)$$

式中 $A(k)$ 表示第 k 个音频数据段.

2.2 水印的降维处理

由于全息图是二维图像, 要将其嵌入到一维的数字音频信号中, 必须对其进行降维处理^[10], 得到

$$S(k) = H(i, j) \quad (0 \leq i < M_1, 0 \leq j < M_2, k = i \times M_2 + j) \quad (8)$$

通过降维, 二维图像的像素由序列 $S(k)$ 的元素表示.

2.3 伪随机排序

为了消除水印中相连元素的相关性, 提高嵌入水印的稳健性, 本文采用伪随机序列对降维处理后的全息图中所有元素进行伪随机排序

$$S'(k') = S(k) \quad (0 \leq k < M_1 \times M_2, 0 \leq k' < M_1 \times M_2) \quad (9)$$

通过排序, 原序列中的第 k 个元素移动到了第 k' 个元素的位置上.

2.4 水印的位分解

$S'(k)$ 为灰度级为 2^T 的灰度值, 为满足量化算法, 还需要进行位分解, 每一个灰度值分解为 T 位的二进制序列, $S'(k)$ 的位分解方法为

$$S''(p) = \begin{cases} 1 & \{\text{Integer}[S'(k)/2^t] \text{MOD}(2)\} = 1 \\ 0 & \{\text{Integer}[S'(k)/2^t] \text{MOD}(2)\} = 0 \end{cases} \quad (p = 0, 1, \dots, M_1 \times M_2 \times T - 1, t = 1, 2, \dots, T, 0 \leq k < M_1 \times M_2) \quad (10)$$

2.5 DCT 域水印嵌入

1) 对第 k 个音频数据段 $A(k)$ 进行离散余弦变换

$$D(k) = \text{DCT}[A(k)], 0 \leq k < M_1 \times M_2 \quad (11)$$

2) 基于幅度量化的水印嵌入算法

由于音频信号的能量主要集中在频谱低频部分,音频信号处理主要破坏频谱高频信息,所以本文将编码二值序列嵌入到 DCT 变换系数低频成分上. 音频信号是可以大于 0 也可以小于 0 的双极性系数,因此采用双极性系数量化算法^[11]对 $D(k)$ 进行量化:取量化间隔位 Δ ,把系数分为相连的 A 区间集和 B 区间集,当 $S'_k(p)$ 为 1 时, $D(k)$ 对应的数据就量化为最近的 A 区间中的中点值;当 $S'_k(p)$ 为 0 时, $D(k)$ 对应的数据就量化为最近的 B 区间中的中点值,即

$$D'(k) \in \begin{cases} A, & S'_k(p) = 1 \\ B, & S'_k(p) = 0 \end{cases} \quad (12)$$

3) 离散余弦逆变换

将经过量化算法处理的含水印信息的 $D'(k)$ 进行离散余弦逆变换

$$D''(k) = \text{IDCT}[D'(k)] \quad (0 \leq k < M_1 \times M_2) \quad (13)$$

$D''(k)$ 为最终得到的含水印的数字音频信号.

3 数字音频水印的提取

水印的提取是水印嵌入过程的逆过程,先按上述分段规则对音频信号进行分段处理,然后对每一段音频信号进行离散余弦变换,根据量化过程抽取水印后,进行位分解逆变换、伪随机逆排序和升维处理,最后对提取的数据进行全息图的重现,得到嵌入的原始水印信息.

为了消除观察者经验、环境条件等因素的影响,采用峰值信噪比对原始水印 H 和抽取的数字全息图水印 H_s 的相似性做客观评价,峰值信噪比的定义为

$$\text{PSNR} = 10 \times \lg \frac{(M_1 \times M_2) \times [\text{Max} \forall_{i,j} w(i,j)]^2}{\sum_{i=1}^{M_1} \sum_{j=1}^{M_2} [w(i,j) - w_s(i,j)]^2} \quad (14)$$

4 计算机实验结果

在实验中,采用 16 位 44.1 k/s 采样率的数字音频信号作为原始音频信号,其波形如图 4(a). 选取 64×64 的二值图像作为水印图像,如图 5(a). 嵌入全息水印后的音频信号为图 4(b),比较原始音频信号和嵌入水印后的音频信号,几乎没有任何差别.

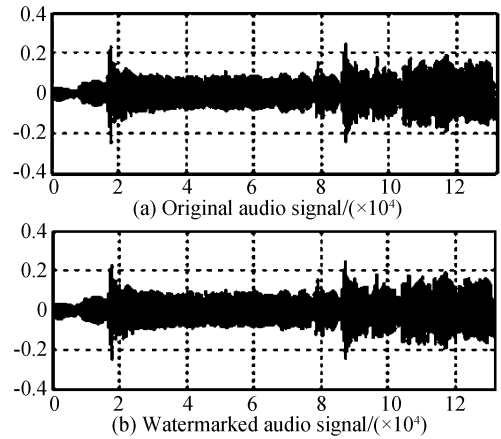


图 4 实验使用的宿主音频信号和嵌入水印后的结果
Fig. 4 Content audio signal and the result by hiding watermark in experiment

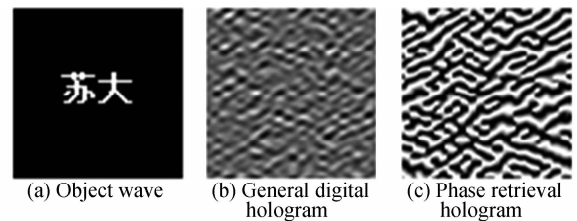


图 5 两种数字全息图的仿真结果

Fig. 5 Simulation results of two types digital hologram

图 5(a) 作为原始水印信息,它的普通傅里叶变换全息图为图 5(b),作为对比,本文提出的相位恢复傅里叶变换全息图为图 5(c),从图中可以看出本文提出相位恢复全息图比普通傅里叶变换全息图具有更高的全息条纹对比度,为提高水印的稳健性提供了条件.

为了验证本文的算法具有很好的稳健性,作者特意将文献[8]的普通的傅里叶变换全息算法和本文所采用的算法做同样的加入高斯白噪声(均值为 0,不同标准差),进行对比实验结果,并计算再现的数字全息水印的峰值信噪比. 实验结果如图 6 和表 1.

为给出定量质量评价,表 1 是两种全息方法在相同嵌入条件提取的水印峰值信噪比,同时测得普通全息方法对应的含水印音频信号峰值信噪比分别为 37.5009、35.5675、33.9915、32.6445、31.4902,本文算法得到的分别是 37.5119、35.5776、33.9881、32.6373、31.4885. 可见在相同嵌入条件时,两种方法含水印的音频信号的峰值信噪比相近,说明对原始音频的影响相近. 但本文方法提取水印的峰值信噪比远高于普通全息方法,随着噪声的增加本文方法的优越性越来越明显,具有更好的抵抗水印攻击的能力.

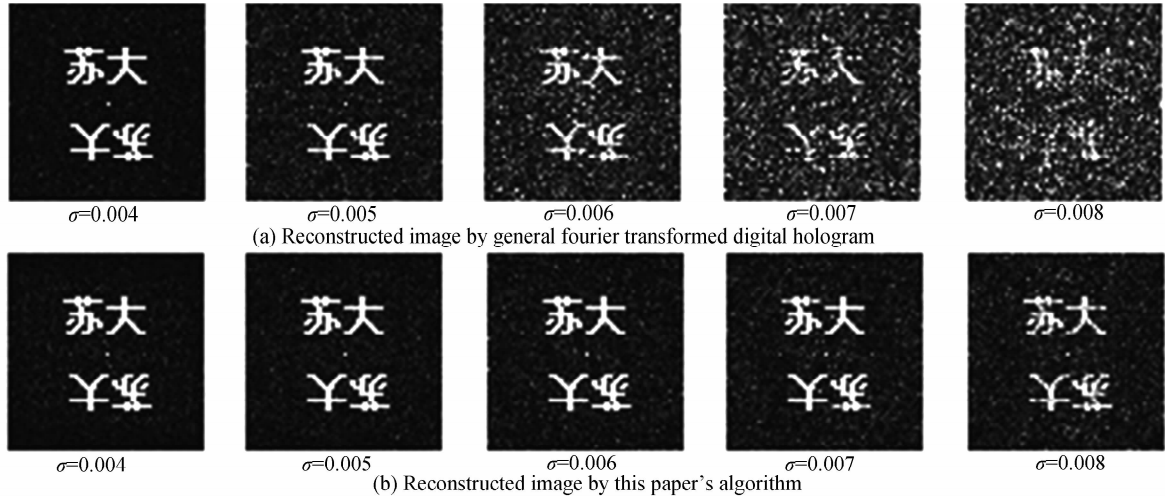


图6 两种数字全息音频水印算法经加入高斯白噪声后提取的再现像比较

Fig. 6 Compare results of the reconstructed image by two digital hologram algorithm attacked with gauss noise

表1 两种全息方法在相同嵌入条件提取水印的峰值信噪比 (dB)

高斯白噪声标准差	0.004	0.005	0.006	0.007	0.008
普通全息方法	28.372 4	19.831 9	14.316 9	11.740 5	10.336 1
本文方法	32.384 9	27.515 1	23.837 6	21.880 1	19.268 9

因为音频水印攻击方法还有: mp3 压缩、重采样、低通滤波,对含水印的音频信号进一步进行如下处理: 1) 音频 mp3 压缩/解压缩,压缩比为 6.3:1; 2) 低通滤波,取长度为 10,截止频率为 20 kHz 的切比雪夫低通滤波器; 3) 重新采样,先进行下抽样 44.1 kHz 到 22.05 kHz,再进行内插由 22.05 kHz 到 44.1 kHz. 实验结果如图 7 所示. 图 7(a)~(c) 给出了利用普通数字全息音频水印算法从受攻击的含水印数字音频信号中抽取出的水印,分别是受压缩、滤波、重采样攻击后提取的水印.

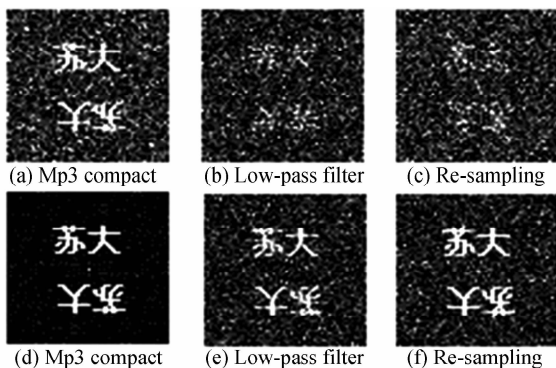


图7 mp3 压缩、滤波、重采样对比结果

Fig. 7 Compare results of mp3 compact, filter and re-sampling

为了跟普通全息音频水印对比,图 7(d)~(f) 给出利用本文方法从受相同攻击强度的含水印数字音频信号中抽取出的水印,分别是受压缩、滤波、重采样攻击后提取的水印. 图 7 的结果进一步说明了本文提出的算法比普通全息音频水印算法具有更好的稳健性.

5 结论

由于人类听觉系统极为灵敏,使得音频水印的研究具有极大的挑战性. 本文提出了一种新的基于相位恢复和数字全息技术的数字音频水印算法,改进了普通的数字全息技术音频水印算法. 水印图像经相位恢复处理形成虚拟物光波,与参考光波发生干涉形成高对比度的傅里叶变换全息图,利用量化方案来隐藏水印,在水印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. 仿真实验表明对通常的音频信号攻击,本文算法的稳健性比普通的数字全息音频水印技术有了很大的提高,具有很好的实用价值. 音频水印信号的纯光学方法实现,需将一维音频时域信号转换到光学的二维空域或者频域,相位恢复得到的虚拟波前要加工成二元光学元件,然后进行相干光学处理,这是我们下一步研究的重点.

参考文献

- [1] WANG R K, WATSON I A, CHATWIN C. Random phase encoding for optical security[J]. *Opt Eng*, 1996, **35**(9): 2464-2469.
- [2] SITU Guo-hai, ZHANG Jing-juan. Image hiding with computer generated phase codes for optical authentication[J]. *Opt Commun*, 2005, **245**(1-6): 55-65.
- [3] CHANG H T, TSAN C L. Image watermarking by use of digital holography embedded in the discrete-cosine-transform domain[J]. *Appl Opt*, 2005, **44**(29): 6211-6219.
- [4] LIU Xiao-ke, SU Xian-yu. An hologram watermark technique based on image partly embedding[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(4): 740-744.

刘晓珂, 苏显渝. 基于图像部分加入的数字全息水印技术[J].

- 光子学报,2008,**37**(4):740-744.
- [5] HUANG Qing-long, LIU Jian-lan. Blind digital watermarking technique based on fresnel hologram and discrete cosine transform[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(12): 2261-2265.
黄清龙,刘建岚. 基于菲涅耳全息图和离散余弦变换的“盲数字水印”技术[J]. 光子学报,2007,**36**(12):2261-2265.
- [6] YIN Zhong-hai, JIAN Jian-feng, HAN Yi-na, *et al.* Upper limit of embedded strength of transformation domain digital fingerprinting under invisible target of image fidelity constraint [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(8):1557-1560.
尹忠海,简剑锋,韩毅娜,等. 以影像逼真度为约束条件的变换域指纹嵌入强度[J]. 光子学报,2007,**36**(8):1557-1560.
- [7] ZHANG Peng, PENG Xiang, NIU Han-ben. A 3-D digital watermarking system based on virtual-optics and random mask encoding[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(8):1220-1223.
张鹏,彭翔,牛憨笨. 一种结合随机模板编码的虚拟光学三维数字水印系统[J]. 光子学报,2005,**34**(8):1220-1223.
- [8] LIU Wei, GU Ji-hua, YU Chi-liang, *et al.* A blind audio watermark algorithm by a holographic technique [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(11):1788-1792.
刘薇,顾济华,尉迟亮,等. 一种基于数字全息技术的盲音频水印算法[J]. 光子学报,2006,**35**(11):1788-1792.
- [9] TAO Zhi, ZHAO He-ming, GU Ji-hua, *et al.* Audio watermarking based on psychoacoustic model and critical band wavelet transform[J]. *Acta Acustica*, 2006, **31**(2):114-119.
陶智,赵鹤鸣,顾济华,等. 基于心理声学模型和临界频带子波变换的数字声频水印[J]. 声学学报,2006,**31**(2):114-119.
- [10] SU Fu-Lin, MA Guo-qiang, LI Ming-jiang. A new watermarking algorithm with gray-level image watermarks [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2001, **23**(8):88-91.
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[J]. 系统工程与电子技术,2001,**23**(8):88-91.
- [11] WANG Qiu-sheng, SUN Sheng-he. Watermark embedding algorithms based on quantizing frequency domain parameters of digital audio signal[J]. *Acta Acustica*, 2002, **27**(4):379-385.
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[J]. 声学学报,2002,**27**(4):379-385.

Audio Watermarking Based on Phase Retrieval Algorithm and Digital Holography

CHEN Da-qing, GU Ji-hua, TAO Zhi

(a. *Physics Department*; b. *Key Lab of Modern Optical Engineering of Jiangsu Province*,
Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China)

Abstract: A new approach of audio watermarking by use of phase retrieval algorithm and digital holography is proposed. The watermarking image is transformed into virtual object wave after phase retrieval algorithm. It interferes with the reference wave to form high contrast Fourier-transformed digital hologram. And the hologram is embedded into audio signal by quantification process and discrete-cosine-transform. The watermark can be extracted without the original audio signal and the security key provides a good security. Numerical experiments show that the algorithm is robust against common signal manipulations and attacks, such as lossy compression, re-sampling, low pass filter, noise, and so on.

Key words: Information optics; Digital holography; Phase retrieval; Audio watermarking; Discrete cosine transform



CHEN Da-qing was born in 1971. He received the M. S. degree in optics from Soochow University in 2005. Now he is a Ph. D. degree candidate, and his research interests focus on optical information processing and digital watermarking.