

# 采用 DFT 域嵌入的全息水印方法<sup>①</sup>

李国明, 李象霖

(中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 研究了基于计算数字全息数字水印技术, 针对水印的稳健性与不可见性的矛盾, 提出了一种基于离散傅立叶变换域嵌入二值全息图的数字水印算法, 并进行了计算机仿真实验。本算法首先生成二值水印图像的傅立叶全息图并进行二值化, 再对载体图像进行傅立叶变换, 将二值化的全息图嵌入到载体图像傅立叶变换幅度谱中。使用该方法嵌入的水印具有良好的不可见性和稳健性, 通过仿真实验证明, 加水印图像的峰值信噪比高且对常见的图像处理都具有良好的稳健性。

**关键词:** 傅立叶变换; 数字全息; 数字水印; 二值化; 空间延拓

## Holographic Watermarking Scheme Based on DFT Domain Embedding

LI Guo-Ming, LI Xiang-Lin

(Graduate University, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** This paper studies the watermarking techniques based on Computer Generated Holography. Given that it is always a contradiction of transparency and robustness, this paper proposes a digital watermarking scheme based on techniques of dithered computer generated holograms and DFT domain embedding in order to improve the watermark's transparency and keep its good robustness as well. The dithered hologram is first generated from the binary watermark image and the DFT is performed to the original image. Then, each bit of the continued hologram is embedded in magnitude of the DFT domain at the middle frequency. The experiment based on this scheme demonstrates that the watermark is both transparent and robust to common digital image processing.

**Keywords:** fourier transformation; digital holography; digital watermarking; dithering; space continuation

## 1 引言

随着计算机网络和通信技术的发展, 数字媒体的信息安全、知识产权保护和认证等问题成了一个重要而紧迫的研究课题。因此, 数字水印技术引起了人们的高度重视并逐渐成为国内外多媒体信号处理领域的一个研究热点。多媒体数字水印技术是利用数字媒体普遍存在信息冗余性与随机性的特点, 向其中嵌入不易察觉但足以判定和区分的秘密信息——水印, 从而起到保护作品版权或完整性的作用。

数字全息技术最早是由日本学者 Takai 和 Mifune 于 2002 年提出的<sup>[1]</sup>, 并成功地将二维水印信号以全息图的形式嵌入到原始图像中。为了改进 Takai 等人的

方法, Chang 等提出一种基于离散余弦变换域的数字全息水印技术<sup>[2]</sup>, 尉迟亮等在上述工作的基础上又提出了基于 JPEG 模型的嵌入方法<sup>[3]</sup>, 提高了水印抗 JPEG 压缩和剪切的能力。最近, 陈木生提出一种基于小波域的全息水印方法<sup>[4]</sup>, 使得水印对 JPEG 压缩和剪切攻击的抵抗能力又有了进一步提高。

以上水印方案仅针对 JPEG 压缩和剪切进行了分析和处理。因此, 为了进一步提高全息水印的实用性, 在保证水印有足够透明性的前提下, 使其对一般的图像处理操作都具有稳健性, 本文提出一种基于数字全息和离散傅立叶变换的水印新方法。首先, 对二值水印图像进行傅立叶变换, 得到水印图像的数字全息图

① 收稿时间:2010-08-20;收到修改稿时间:2010-11-01

并进行二值化；接着将原始载体图像进行离散傅立叶变换并选择中频待嵌入区域；随后将二值化数字全息图像嵌入载体图像中频区域的幅度系数中,再通过傅立叶逆变换得到含水印图像；水印提取是水印嵌入的逆过程。同时，通过仿真试验验证了本文方法的可行性和可信性；仿真试验结果表明，该方法对一般的图像处理操作，都具有较好的稳健性。

## 2 计算数字全息<sup>[5,6]</sup>

### 2.1 生成数字全息图

设二值水印图像为  $w(x,y)$ ，为取得比较平稳的傅立叶谱，先通过一个随机相位模板对水印图像进行调制，经调制后的水印图像表示为

$$w_0(x,y) = w(x,y) \cdot e^{i\varphi(x,y)} \quad (1)$$

式(1)中二维相位  $\varphi(x,y)$  是由高斯随机数决定的，通过调制的水印图像经过傅立叶变换，然后同参考光相干涉，干涉产生的强度分布场就是用来嵌入的傅立叶变换全息图。水印图像的傅立叶变换为

$$W(\xi,\eta) = \iint w_0(x,y) \cdot e^{-2\pi i(x\xi+y\eta)} dx dy \quad (2)$$

参考光定义为

$$R(\xi,\eta) = R_0 \cdot e^{2i\pi(a\xi+b\eta)} \quad (3)$$

则水印图像傅立叶变换谱和参考光相干涉后的光场分布为

$$H(\xi,\eta) = |W(\xi,\eta) + R(\xi,\eta)|^2 = |W(\xi,\eta)|^2 + |R(\xi,\eta)|^2 + W^*(\xi,\eta) \cdot R(\xi,\eta) + W(\xi,\eta) \cdot R^*(\xi,\eta) \quad (4)$$

式(4)中第一项和第二项是傅立叶变换全息图的晕轮光和中心亮点，对再现水印没有实际价值，且会影响再现效果，故可以将它们去除。因此，得到的实际有效的全息图信息为

$$H_w(\xi,\eta) = W^*(\xi,\eta) \cdot R(\xi,\eta) + W(\xi,\eta) \cdot R^*(\xi,\eta) \quad (5)$$

它记录了物光波（即调制后水印图像）的有意义振幅和相位信息，我们再对其做二值化，这就是用来

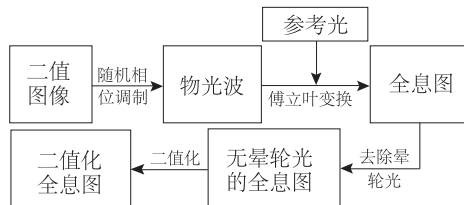


图 1 生成数字全息图

嵌入原始图像的水印信号。水印全息图的生成过程如图 1 所示，原始水印图像如图 2 所示，得到的二值化傅立叶计算全息图如图 3 所示。

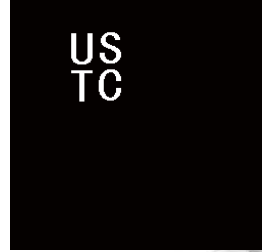


图 2 二值水印图像

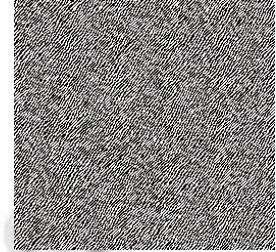


图 3 水印数字全息图

### 2.2 再现数字全息图

数字全息图的再现是用描述重构光的数学表达式与全息图相乘，并进行傅立叶逆变换，从而获得再现像的光强分布，重构光可以定义为

$$S(\xi,\eta) = |S(\xi,\eta)| \cdot e^{i\psi(\xi,\eta)} \quad (6)$$

为简化计算，在取  $S=1, \psi=0$  的情况下，傅立叶逆变换得到的重构图像为

$$W_R(x,y) = \iint H_w(\xi,\eta) \cdot e^{2i\pi(x\xi+y\eta)} d\xi d\eta \quad (7)$$

将式(5)代入式(7)就可以得到重构光场为

$$W_R = w_0^*[(x-a),(y-b)] + w_0[-(x+a),-(y+b)] \quad (8)$$

式(8)表明原始像和共轭像同时再现在平面上，分别以  $(a,b), (-a,-b)$  为中心，再现像的位置可以由常量  $a$  和  $b$  的选择来控制。整个再现过程如图 4 所示，由图 3 所示的全息图重构的水印图像如图 5 所示。

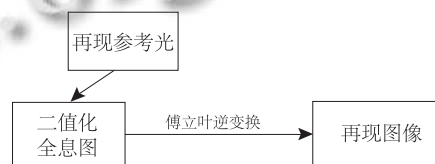


图 4 数字全息图再现



图 5 再现的水印图像

### 3 水印嵌入与检测

#### 3.1 算法描述

图像水印系统一般可以用式(9)表示, 其中  $I$  表示原始载体图像,  $W$  表示水印信号,  $K$  表示水印密钥,  $E$  表示将水印嵌入所使用的嵌入算法,  $I_w$  表示嵌入水印后的载体图像,  $D$  表示水印检测算法,  $W^*$  表示提取出的水印信号。

$$\begin{aligned} I_w &= E(I, W, K) \\ W^* &= D(I_w, K, I) \end{aligned} \quad (9)$$

一般数字全息水印在做嵌入时, 都直接使用傅立叶变换全息图, 且将全息图的全部数据都嵌入到载体图像中。而实际上, 全息图本身就具有很高的冗余性, 就数字水印的应用而言, 上述的嵌入方式并没有增加水印数据的嵌入量, 相反, 却降低了原始载体图像的质量。我们针对这一问题, 采用了部分嵌入二值化数字全息图的方案, 极大地提高了水印的不可见性, 同时也保证了水印的稳健性。

在嵌入方式上, 我们选择了在图像二维傅里叶变换(DFT)的中频区域嵌入水印数据。因为 DFT 的低频区域包含图像的视觉敏感信息, 它的微小变化会引起图像的严重失真; 同时 DFT 的高频区域在图像处理中很容易被破坏, 使水印数据不可恢复; 而 DFT 的中频区域对一般的图像处理既具有较强的稳定性, 又不会因微小的改变对原始图像造成较大的失真。另外, 原函数  $f(x, y)$  与傅立叶变换函数  $F(u, v)$  幅度谱间的线性、时移性、对称性、尺度反比性、旋转保持相同角度的特性<sup>[7]</sup>, 使得我们的水印方案对 RST 攻击也具有一定的稳健性。

从以上分析可以看出, 由于本文算法在嵌入前对全息水印做了二值化处理, 在不影响水印提取的前提下, 减少了嵌入量, 提高了加水印图像的质量; 同时, 我们选择了 DFT 中频区域嵌入, 在能够抵抗一般图像处理攻击的基础上, 使得水印还具有一定的抵抗 RST 攻击的能力, 增强了水印的稳健性和实用性; 水印嵌入和检测可以使用 FFT 算法, 运算速度快, 具有较高的实用价值。

#### 3.2 水印嵌入

首先设载体图像  $I$  为  $M \times M$  的 256 级灰度图像, 水印图像  $W$  为  $M/2 \times M/2$  的二值图像, 则水印的嵌入步骤如下:

步骤 1: 对载体图像  $I$  做离散傅立叶变换, 得到傅

立叶变换幅度谱  $F_A$  和相位谱  $F_p$

步骤 2: 对二值水印图像  $W$  按 2.1 节所述生成二值全息图

步骤 3: 为保持离散傅立叶变换幅度谱的中心对称性, 对二值全息图按式(10)做空间延拓, 其中  $m = M/2, n = M/2$

$$H_e = \begin{cases} H_w(\xi, \eta), & \text{当 } \xi \in [0, m], \eta \in [0, n] \\ H_w(\xi, N - \eta - 1), & \text{当 } \xi \in [0, m], \eta \in [n, N - 1] \\ H_w(M - \xi - 1, \eta), & \text{当 } \xi \in [m, M - 1], \eta \in [0, n] \\ H_w(M - \xi - 1, N - \eta - 1), & \text{当 } \xi \in [m, M - 1], \eta \in [n, N - 1] \end{cases} \quad (10)$$

步骤 4: 选取傅立叶变换幅度谱  $F_A$  的中频区域, 即以  $R_L$  为内径,  $R_H$  为外径的圆盘区域, 按式(11)嵌入全息水印, 其中  $\alpha$  为嵌入强度,  $\alpha$  越大, 水印稳健性越好, 但不可见性会降低, 在实际应用中需要平衡这一矛盾

$$\begin{aligned} &\text{当 } R_L^2 < u^2 + v^2 \leq R_H^2 \\ F_A^w &= \begin{cases} F_A(u, v) \cdot (1 + \alpha): H_e(u, v) = 1 \\ F_A(u, v) \cdot (1 - \alpha): H_e(u, v) = 0 \end{cases} \\ &\text{当 } u^2 + v^2 \leq R_L^2 \text{ 或者 } u^2 + v^2 > R_H^2 \\ F_A^w &= F_A(u, v) \end{aligned} \quad (11)$$

步骤 5: 利用新的幅度谱  $F_A^w$  和原始相位信息  $F_p$  作傅立叶逆变换, 得到加水印图像  $I_w$

嵌入水印后图像质量的客观评价一般用峰值信噪比来衡量, 对于 256 级灰度的图像, 其计算公式为(12):

$$PSNR = 10 \log_{10} \left[ \frac{255^2}{\frac{1}{M \cdot N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (x_{ij} - x'_{ij})^2} \right] \quad (12)$$

#### 3.3 水印检测

水印检测就是水印嵌入的逆运算, 需要原始图像参与。设待检测图像  $I^*$  和原始图像  $I$  都是  $M \times M$  的 256 级灰度图像, 则具体检测步骤如下:

步骤 1: 对原始图像  $I$  及待测图像  $I^*$  作傅立叶变换, 得到  $I$  及  $I^*$  的幅度谱分别为  $F_A$  和  $F_A^*$ ;

步骤 2: 按式(13)恢复全息水印信号  $H_r$ ;

$$\begin{aligned} &\text{当 } R_L^2 < u^2 + v^2 \leq R_H^2 \\ H_r(u, v) &= \begin{cases} 1: F_A^*(u, v) > F_A(u, v) \\ 0: F_A^*(u, v) \leq F_A(u, v) \end{cases} \\ &\text{当 } u^2 + v^2 \leq R_L^2 \text{ 或者 } u^2 + v^2 > R_H^2 \\ H_r(u, v) &= 0 \end{aligned} \quad (13)$$

步骤 3: 根据 2.2 节所述方法, 通过  $H_r$  重构水印图像, 并根据重构图像判断水印是否存在。

#### 4 仿真实验结果

为了检验本文算法的性能, 在 MATLAB 7.5 平台上进行了仿真实验。实验中使用了  $512 \times 512$  的 lena.bmp 标准灰度图像作为载体图像如图 6 所示,  $256 \times 256$  的二值文字标示图像作为水印图像如图 2 所示。



图 6 原始图像

本文的试验结果都是在取  $\alpha = 0.15$ ,  $R_L = 64$ ,  $R_H = 200$  的条件下得到的, 在该嵌入强度及所选择的中频区域的条件下, 本算法能够取得非常好的透明性与稳健性的平衡。嵌入水印后的载体图像如图 7 所示, 与原图像在视觉上不易分辨, 作为客观评价的 PSNR 值为 49.02。通过图 7 提取出的水印如图 8 所示。



图 7 加入水印后的图像

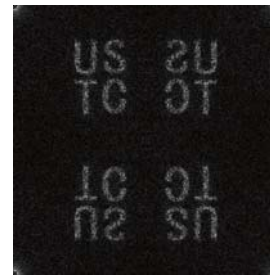


图 8 提取出的水印图像

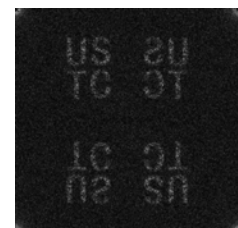
表 1 含水印图像受攻击后的实验结果

攻击操作	试验参数	PSNR(dB)	提取水印
未受攻击	N/A	49.02	成功
JPEG 压缩	质量因子 95	45.04	成功
	质量因子 90	43.32	成功
JPEG2000 压缩	质量因子 85	42.32	成功
	质量因子 85	45.70	成功
高斯滤波	$3 \times 3, \sigma = 0.3$	49.00	成功
	$5 \times 5, \sigma = 0.3$	49.00	成功
缩放	缩小 50%	49.02	成功
	缩小 20%	49.00	成功
	放大 20%	49.01	成功
旋转	放大 50%	49.01	成功
	30 度	52.21	成功
	45 度	52.44	成功
剪切	随机剪切	49.52	成功
	左上角 1/4 剪切	50.21	成功
	中心 1/4 剪切	50.14	成功
	中心 1/2 剪切	50.93	成功

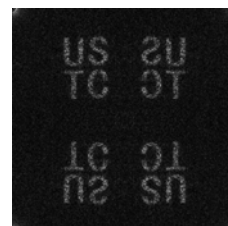
为验证该水印算法对图像处理和各种攻击的抵抗能力, 进行了表 1 中列出的图像处理及攻击实验。对于几何攻击, 检测前都先将原始图像进行了与攻击相同的几何变换, 在保证图像对准的情况下进行检测。



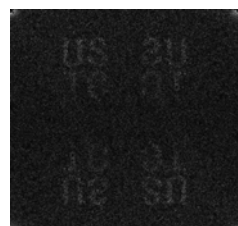
(a)JPEG 压缩



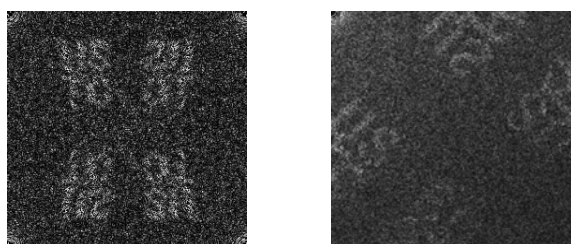
(b)JPEG2000 压缩



(c)高斯滤波



(d)中心剪切 1/2



(e)缩小 1/2 (f)旋转 45 度

图9 攻击后恢复的水印图像

图9即为使用本算法嵌入的水印在受到各种攻击后恢复出的水印图像,其中:(a)为质量因子为85的JPEG压缩,(b)为质量因子为85的JPEG2000压缩,(c)为高斯滤波,参数为 $(5 \times 5, \sigma = 0.3)$ , (d)为中心剪切1/2攻击,(e)为缩小50%攻击,(f)为旋转45度攻击后恢复出来的水印图像。

## 5 结论

本文提出的水印算法,在计算出二值水印图像数字全息图的基础上,进一步对全息图进行了二值化;接着将原始载体图像进行离散傅立叶变换;随后将部分二值化的数字全息图对应地嵌入载体图像中频区域的幅度系数中,再通过傅立叶逆变换得到含水印图像;

(上接第8页)

提供了最优化的经济解决方案,可把无线传感器网采集的数据根据数据量大小、传输距离和优先级分成若干数据分组,针对每一数据分组制定传输方案,实现整体经济性最优化。

通过分析,与传统的物联网网络层相比,三层网络体系架构增加了蜂窝移动通信网络和卫星网络,通过比较其各自的主要特征(见表1),新的架构不但扩大了物联网的覆盖范围,而且也提高了整个物联网体系的可靠性和经济性。

## 4 结语

本文针对物联网的特点,提出了一种新的物联网网络层三层架构,来解决物联网实际应用问题。该架构采用分层数据传递的方法,一方面利用蜂窝移动通信网络实现实时、大规模数据的低成本传输,另一方面利用北斗卫星系统的通信功能实现远距离通信,从而增大了远程监控的能力,减小了物联网运营的成本

水印提取是水印嵌入的逆过程。实验结果表明,该算法对水印图像的嵌入和提取简单有效,加水印图像的保真度高,同时对常见的图像处理,如JPEG压缩, JPEG2000压缩,一般的滤波攻击、旋转攻击、缩放攻击及剪切攻击等,都具有良好的稳健性。

## 参考文献

- 1 Takai N, Mifune Y. Digital watermarking by a holographic technique. *Applied Optics*, 2002,41(5):865-873.
- 2 Chang HT, Tsan CL. Image watermarking by use of digital holography embedded in the discrete cosine transform domain. *Applied Optics*, 2005,44(29):6211-6219.
- 3 尉迟亮,顾济华,刘薇,陶智.基于数字全息及离散余弦变换的图像数字水印技术. *光学学报*, 2006,26(3):355-361.
- 4 陈木生.基于数字全息与小波变换的图像数字水印技术. *光学技术*, 2009,35(5):678-681.
- 5 Goodman JW. 傅里叶光学导论.第3版.北京:电子工业出版社,2006.
- 6 苏显渝,李继陶.信息光学.北京:科学出版社,1999.
- 7 Solachidis V, Pitas I. Circularly symmetric watermark embedding in 2-D DFT domain. *IEEEIC on Acoustics, Speech, and Signal Processing*. Phoenix: IEEE Computer Society, 1999,6:3469-3472.

支出。在下一步的研究中,我们将继续完善该体系架构,以提高体系架构对网络拓扑变化的适应能力,并力图应用于实际。

## 参考文献

- 1 International Telecommunication Union. *Internet Reports 2005: The Internet of Things*. Geneva: ITU, 2005.
- 2 通信产业网.2010年物联网发展研究报告.[2010-1-12]. <http://www.ccidcom.com/html/xingyebaogao/baipishu/201001/12-91179.html>
- 3 宋文,王兵,周应宾,等.无线传感器网络技术与应用.北京:电子工业出版社,2007.269-275.
- 4 伍疆,罗常青,晋艳伟.无线网络传输系统设计.北京:电子工业出版社,2003:85-94.
- 5 书惠民,李白萍.蜂窝移动通信技术.西安:西安电子科技大学出版社,2002.9-11.
- 6 潘巍,常江,张北江.“北斗一号”定位系统介绍及其应用分析. *数字通信世界*, 2009,(9):25-28.