

一种改进的基于 PDE 的数字水印算法

徐树升,许建龙

(浙江理工大学信息学院,杭州 310018)

摘 要:提出了一种改进的基于 PDE 的数字水印算法,该算法先利用二维 logistic 混沌映射对水印图像进行置乱变换,并将置乱后的水印划分成两部分水印。利用偏微分方程分解模型对载体宿主图像进行分解,生成卡通和纹理两个部分。根据卡通和纹理两部分的图像复杂度的不同,分别对其进行 DWT 和 SVD,再将已生成的两部分水印按照加性方式分别嵌入到二级小波变换的低频部分和 SVD 的对角矩阵中。结果表明,该算法不仅有很好的不可见性,而且对 Gaussian 噪声、JPEG 压缩以及低度旋转等攻击具有很好的鲁棒性。

关键词:数字水印;小波变换;偏微分方程;奇异值分解;混沌映射

中图分类号:TP391 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-3851(2016)06-0886-05 **引用页码:**110603

0 引 言

随着互联网的快速普及,数字水印技术作为一种用来保护图像、音频和视频等多媒体的信息安全的新技术,被广泛重视。目前已经有许多不同的数字水印技术被提出,而这些技术主要被分为两类:空间域方法^[1-2]和变换域方法^[3-4]。而变换域方法由于具有较好的鲁棒性和不可见性,成为了人们在数字水印研究中的主要方向。

Aherraaron 等^[5]提出了一种基于偏微分方程(partial differential equations, PDE)的变换域数字水印算法,基本思想是首先利用 Rudin 等^[6]提出的 PDE 分解模型对原始图像先进行分解,将原始图像分解成卡通、纹理和噪声 3 个部分,再将水印嵌入到离散余弦变换(discrete cosine transform, DCT)处理以后的各子块中。该算法选取的 PDE 分解模型是将图像分解成卡通、纹理和噪声 3 个部分,将水印嵌入到噪声部分时,在未受到攻击时,该水印算法具有十分良好的不可见性,但是由于噪声部分能量比较小,经过 Gaussian 噪声、JPEG 压缩和缩放等攻击以后,其鲁棒性会发生明显下降。

针对文献[5]算法的缺陷,本文提出一种基于 PDE 分解模型结合离散小波变换(discrete wavelet transform, DWT)与奇异值分解(singular value decomposition, SVD)的数字水印算法。基本思想是选取一种新的 PDE 分解模型,将载体宿主图像分解卡通和纹理部分,再根据卡通与纹理部分的能量与复杂度的不同,对其使用不同的处理方式,再嵌入水印,以保证水印的鲁棒性与不可见性。

1 PDE 分解模型

图像分解是图像处理中的一项重要研究内容,一项好的图像分技术可以帮助我们从图像中提取出包含图像结构信息的卡通部分 u 和由纹理等构成的纹理部分 v ,从而为后续工作奠定良好基础。近年来,基于全变分方法的偏微分方程模型已经成为图像分解的研究热点,其中比较经典的是 Rudin 等^[6]首先提出的一种基于全变分方法的最小化模型 TV-L²:

$$\min_u \int_{\Omega} [|\nabla u| + \frac{\lambda}{2}(f - k \times u)^2] dx \quad (1)$$



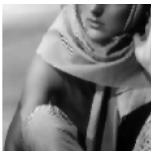
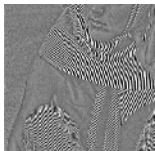
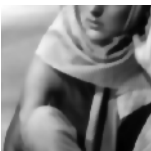
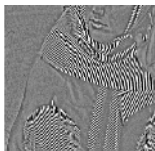
其中: f 为原始图像, u 为去噪以后的图像,常数 $\lambda > 0$ 为协调常数,来协调 f 和 u 之间的权重。该模

型也被称为 ROF 模型,起初是用于图像去噪,可以很好的刻画图像的边缘结构,但对图像中的小尺度结构不能很好的描述。后来的学者在此基础上进行了改进,Meyer^[7]提出了 TV-G 模型、Aujol 等^[8]提出的 TV-Hilbert 模型等偏微分模型。对于数字水印算法来说,原始图像经过 PDE 分解成结构和纹理两部分以后,纹理部分包含的纹理信息越复杂,不可见门限就越高,水印的透明性和鲁棒性也就越好。所以,选取一种纹理复杂度较大的全变分分解模型。本文采用图像的熵来描述图像的纹理复杂程度,其定义如下:

$$H = - \sum_i \sum_j P[i, j] \log P[i, j] \quad (2)$$

其中: $P[i, j]$ 表示该灰度值在图像总像素之比。本文对上述 3 种全变分模型进行试验仿真,原始载体图像分解仿真效果和纹理部分熵值如表 1 所示。

表 1 3 种变分模型的图像分解以及纹理部分熵值

全变分模型	卡通部分	纹理部分	纹理部分熵值
TV-L ²			0.243055
TV-G			0.311609
TV-H ⁻¹			0.246386

经过实验对比,选择 TV-G 全变分模型作为本文的 PDE 图像分解模型。

2 离散小波变换和奇异值分解

2.1 离散小波变换

图像在经过离散小波变换以后,可以产生水平和垂直方向的低频子带 LL、水平方向的高频和垂直方向的低频子带 HL、水平方向的低频和垂直方向的高频子带 LH、水平和垂直方向的高频子带 HH。对于 LL(低频子带)可以继续分解,得到更低分辨率的 4 个子带图像。如此反复,可以对图像进行 n 次

小波变换,可以得到 $3n+1$ 个子带。离散小波变换的 2 级分解示意如图 1 所示。

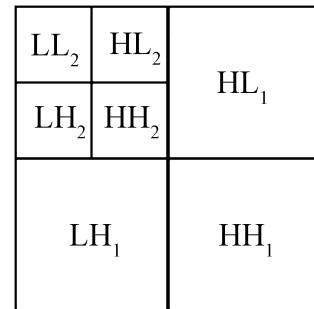


图 1 离散小波变换 2 级分解示意

图像在使用 PDE 模型分解以后生成的卡通部分和纹理部分,选择对卡通部分进行离散小波变换 DWT,相比较原算法中使用离散余弦变换(DCT),除了具有较好的不可见性,小波变换在经过 JPEG 压缩和剪切攻击,也具有更好的鲁棒性。选择把水印嵌入到小波变换以后的低频部分,低频部分系数的幅值一般要大于高频系数,从而具有较大的感觉容量,而且嵌入水印以后的图像在经过数据压缩、低通滤波等处理以后,具有很好的鲁棒性。

2.2 奇异值分解

一幅灰度数字图像可以看成是由许多非负标量组成的矩阵,用 $\mathbf{A} \in \mathbf{R}^{M \times N}$ 来表示一个图像矩阵,其中 \mathbf{R} 表示实数域,则矩阵 \mathbf{A} 的奇异值分解可以定义如下:

$$\mathbf{A} = \mathbf{U} \mathbf{S} \mathbf{V}^T \quad (3)$$

其中: $\mathbf{U} \in \mathbf{R}^{M \times M}$ 和 $\mathbf{V} \in \mathbf{R}^{N \times N}$ 都是正交阵, $\mathbf{S} \in \mathbf{R}^{M \times N}$ 为对角矩阵, T 表示矩阵转置。

若 \mathbf{S} 对角元素 λ_i 满足:

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_\gamma \geq \lambda_{\gamma+1} = \dots = \lambda_M = 0 \quad (4)$$

则称 $\lambda_i (i = 1, 2, \dots, \gamma)$ 为 \mathbf{A} 的非零个数奇异矩阵。

对纹理部分进行 SVD 分解以后,将水印嵌入到其奇异矩阵中,其优点如下:奇异值本身具有非常好的稳定性,可以提高本文算法的鲁棒性。除此之外,对于纹理部分的图像,对其进行 SVD 分解可以得到较理想的 \mathbf{U} 、 \mathbf{V} 、 \mathbf{S} 矩阵数据,减少了对重构后图像的影响,在一定程度上,增强了不可见性。

3 算法实现

3.1 水印嵌入

本算法基本思想先用二维 Logistic 混沌理论生成的混沌序列对水印图像进行置乱加密处理,再将置乱后的水印序列分成两部分水印序列。然后对宿主图像 M 进行 PDE 分解生成卡通和纹理两幅图像,

再分别对这两幅图像进行离散小波变换 DWT 和奇异值分解 SVD,将两部分水印分别加入到低频子带和奇异值中。再对其进行逆小波变换和奇异值逆变换,组合卡通和纹理部分,生成带有水印的图像,具体实现步骤如下。

a) 对水印进行预处理。将大小为 $M \times M$ 水印图像 W 进行二维 Logistic 混沌映射置乱,生成 W_L ,将其划分成两部分水印: w_u 和 w_v ,两部分水印的长度由宿主图像和水印图像的大小决定。

b) 图像分解。本文选取 $N \times N$ 大小的灰度图像作为宿主图像 I ,并对其进行全变分模型 TV-G 分解生成卡通图像 U 和纹理图像 V 。

c) 离散小波变换和奇异值分解。对卡通部分 U 进行两层离散小波变换,选取变换后的低频子带 LL_2 ,记作 I_u 。对纹理部分 V 进行奇异值分解,选取分解以后的奇异值序列 I_v 作为水印嵌入位置。

d) 嵌入水印。将两部分水印 w_u 和 w_v 按照加性方式分别嵌入到低频子带 I_u 和奇异值序列 I_v ,具体嵌入方式如下:

$$I'_u = I_u + \alpha \times w_u \quad (5)$$

$$I'_v = I_v + \beta \times w_v \quad (6)$$

其中: α 和 β 控制水印嵌入强度。

e) 对新生成的低频子带 I'_u 卡通部分进行逆小波变换 IDWT 生成 U' ,使用新奇异值序列 I'_v 对纹理部分进行重新计算生成纹理部分 V' 。最后,对卡通部分 U' 和纹理部分 V' 进行叠加重构,生成嵌入水印以后的图像 I' 。嵌入过程如图 2 所示。

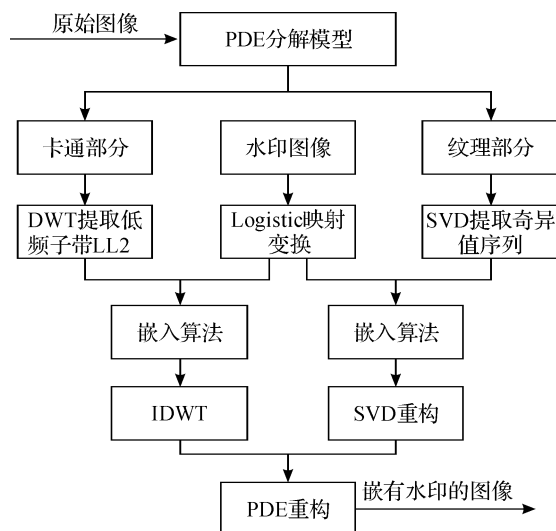


图2 水印嵌入流程

3.2 水印提取

水印提取的过程为水印嵌入的逆过程,具体实现步骤如下:

a) 图像分解。对嵌入水印以后图像 I' 进行全变分模型 TV-G 分解生成卡通部分 U^* 和纹理部分 V^* 。

b) 离散小波变换和奇异值分解。对卡通部分 U^* 和纹理部分 V^* 分别进行两层进行离散小波变换和奇异值分解,提取其低频子带 I_u^* 和奇异值序列 I_v^* 。

c) 提取水印,具体提取方式如下:

$$w_u^* = (I_u^* - I_u) / \alpha \quad (7)$$

$$w_v^* = (I_v^* - I_v) / \beta \quad (8)$$

将两部分水印 w_u^* 和 w_v^* 重新组合生成水印 w^* 。

d) 对上一步提取的水印 w^* 进行 Logistic 逆变换,得到最终的水印图像 w_e^* 。水印提取过程如图 3 所示。

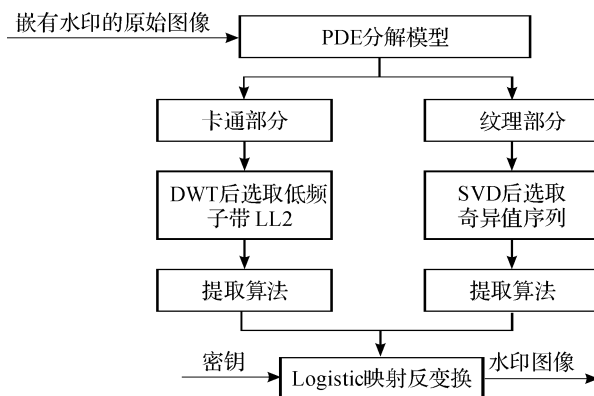


图3 水印提取流程

4 实验结果及分析

根据本文提出的算法,进行下列仿真实验。在实验中采用 512×512 像素的 barb 图像作为宿主图像,采用 64×64 像素的二值图像作为水印图像。Logistic 混沌序列的系统参数 $u = 4$,初值为 $x = 0.2345$ 。本文选择峰值信噪比 PSNR (peak single-to-noise ratio) 来衡量原始图像和嵌入水印后的图像的相似性,它的值越大,透明性越好,其定义如下:

$$PSNR = 10 \log \frac{MN \max[\max(I^2)]}{\sum \sum [I - I']^2} \quad (8)$$

其中: M 和 N 为图像的高和宽, I 代表原始图像, I' 表示嵌入水印后的图像。本文选择归一化相关系数 NC (normalized correlation coefficient) 来评价提取出的水印图像与原始水印图像之间的相似性,其定义如下:

$$NC = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N W(i,j)W'(i,j)}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N W(i,j)^2} \quad (9)$$

其中: M 和 N 为水印图像的高和宽, W 和 W' 分别为原始水印图像和提取出的水印图像。由图 4(a) 和图 5(a) 可以看出, 原始载体图像和含水印的图像在视觉上几乎无差别。本文实验得出 $PSNR = 46.2358$, 一般来说, $PSNR$ 大于 35 dB, 就符合水印算法的不可见性要求, 具有较好的不可见性。在未受到任何攻击的情况下, 提取的水印图像(图 4(b)) 和原始水印(图 5(b)) 之间的的相似度 $NC = 0.9826$ 。实验结果表明, 本文的算法不可见性比较良好, 而且在未受到任何攻击的情况, 能将嵌入的水印几乎无失真的提取出来。



图 4 原始载体图像和水印图像以及水印加密图像



图 5 嵌入水印以后的载体图像和提取的水印

在受到各种水印攻击下, 本文算法的实验结果与文献[5]的算法比较结果如表 2 所示。由表 2 可以看出, 随着各类攻击的方式与程度的不同, 本文算法在对抗低度旋转、Gaussian 噪声以及 JPEG 压缩攻击时, 相对于原算法具有更好的鲁棒性和不可见性。

表 2 本文算法与文献[5]算法比较结果

算法	本文算法		文献[5]算法	
	PSNR	NC	PSNR	NC
JPEG 压缩 ($QF=90\%$)	45.1654	0.9796	45.0924	0.9688
JPEG 压缩 ($QF=75\%$)	36.2540	0.8654	34.9541	0.8214
Gaussian 噪声 (方差=0.002)	24.5621	0.8435	23.7812	0.8103
Gaussian 噪声 (方差=0.004)	22.6931	0.8169	21.6541	0.7432
椒盐噪声 (强度=0.01)	30.8823	0.9501	30.7713	0.9474
椒盐噪声 (强度=0.03)	24.9142	0.9311	23.4589	0.8927
椒盐噪声 (强度=0.05)	19.4513	0.8443	19.9539	0.8757
旋转 10°	18.5378	0.9129	15.4824	0.8735

5 结 语

本文在文献[5]的算法基础上, 首先利用了另一种 PDE 对宿主图像进行分解, 考虑到分解以后卡通和纹理部分的图像特点, 再分别对其进行 DWT 和 SVD 处理, 以保证良好的鲁棒性和不可见性。从仿真实验的结果可以得出, 本文算法具有较好的不可见性, 并且在经过低度旋转、Gaussian 噪声和 JPEG 压缩等水印攻击后, 仍具有较好的鲁棒性。

参考文献:

[1] CVEJIC N, SEPPANEN T. Increasing robustness of LSB audio steganography by reduced distortion LSB coding[J]. Journal of Universal Computer Science. 2005, 11(1):56-65.

[2] BENDER W, GRUHL D, MORIMOTO N, et al. Techniques for data hiding[J]. IBM Systems Journal, 1996, 35(3/4):313-336.

[3] COX I J, KILIAN J, LEIGHTON T, et al. Secure spread spectrum watermarking for images, audio and video [C]//Image Processing, 1996. Proceedings, International Conference on IEEE, 1996, 3:243-246.

[4] WANG H J, SU P C, KUO C C J. Wavelet-based digital image watermarking[J]. Optics Express, 1998, 3(12):491-496.

[5] AHERRAHON N, TAIRI H. A new robust

- watermarking scheme based on PDE decomposition [C]//Computer Systems and Applications(AICCSA), 2013 ACS International Conference on. IEEE, 2013: 1-5.
- [6] RUDIN L I, OSHER S, FATEMI E. Nonlinear total variation based noise removal algorithms[J]. Physica D: Nonlinear Phenomena, 1992, 60(1): 259-268.
- [7] MEYER Y. Oscillating patterns in image processing and nonlinear evolution equations [C]// of University Lecture Series. AMS, Boston, MA, USA, 2001: 122.
- [8] AUJOL J F, GILBOA G. Constrained and SNR-based solutions for TV-Hilbert space image denoising [J]. Journal of Mathematical Imaging and Vision, 2006, 26(1-2): 217-237.

An Improved Digital Watermark Algorithm Based on PDE

XU Shusheng, XU Jianlong

(School of Informatics Science and Technology, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: This paper presents an improved digital watermark algorithm based on PDE. In this paper, we firstly took advantage of logistic chaotic mapping to scramble the watermark image and divided the scrambled watermark image into two parts. Then PDE was used to decompose the host image into cartoon and texture components. And then, DWT and SVD were selected to handle cartoon and texture respectively according to the complexity of these two parts. Lastly, the two watermark images were respectively embedded into the low frequencies of DWT and the diagonal matrix of SVD. Experiments show that the scheme proposed not just has good invisibility, but also has excellent robustness for some conventional watermark attacks such as JPEG compression, Gaussian noise and rotation.

Key words: digital watermark; wavelet transform; partial differential equation; singular value decomposition; chaotic mapping

(责任编辑: 陈和榜)