

基于 BEMD 和位平面分解的彩色图像水印算法*

王小伟, 赖惠成, 龚金辉, 张 慧

(新疆大学 信息科学与工程学院, 乌鲁木齐 830046)

摘 要: 为了得到水印更好的鲁棒性和不可见性,以二维经验模态分解(BEMD)和位平面分解为基础,提出了一种新的彩色图像水印嵌入算法。该算法运用人类视觉系统(HVS)的特性和 Arnold 置乱变换,将位平面分解的水印信息嵌入到宿主图像其中一个固有模态函数(IMF)中,完成水印的有效嵌入。实验表明,该算法具有良好的鲁棒性和不可感知性,能够有效抵抗 JPEG 压缩、中值滤波、旋转、椒盐噪声和高斯噪声等多种恶意攻击。

关键词: 二维经验模态分解; 位平面分解; Arnold 置乱变换; 人类视觉系统

中图分类号: TP391.41

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2014)05-1588-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2014.05.075

Watermarking algorithm for color image based on BEMD and bit plane decomposition

WANG Xiao-wei, LAI Hui-cheng, GONG Jin-hui, ZHANG Hui

(College of Information Science & Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830046, China)

Abstract: In order to get a better robustness and invisibility of the watermarking, this paper proposed a new color image watermarking embedding algorithm, which was based on bidimensional empirical mode decomposition and bit plane decomposition. With the features of human visual system (HVS) and Arnold shuffling transform, it embedded the watermarking information decomposed by the bit plane into one of intrinsic mode functions (IMF) from the host image to finish the effective embedding algorithm. The experimental results show that the algorithm has the better robustness and imperceptibility, so it can be effective against a variety of malicious attacks such as JPEG compression, median filtering, rotating, salt and pepper noise and Gauss noise.

Key words: bidimensional empirical mode decomposition (BEMD); bit plane decomposition; Arnold shuffling transformation; human visual system

0 引言

随着计算机网络技术的发展和各种数字产品的出现,版权保护越来越成为人们所关注的焦点和话题。这几年,在数字图像方面,水印技术的研究层出不穷,其典型算法有空域算法(LSB 最低有效位算法)、Patchwork 算法、变换域算法(如 DCT(离散余弦变换)、DWT(离散小波变换))、压缩域算法、NEC 算法和生理模型算法等。不管哪种算法都要满足水印的基本要求,即不可见性和鲁棒性。为此,很多专家学者对其进行了广泛和深入的研究。李小满等人^[1]提出一种将水印信息替代图像经过二维经验模态分解(BEMD)的其中一个固有模态函数(IMF),完成水印的嵌入。该算法安全性好、鲁棒性强,但对旋转和噪声攻击,鲁棒性一般。冯茂岩等人^[2]根据人类视觉系统(HVS)的特点,提出一种对图像 DCT 不同分块嵌入不同水印能量的水印嵌入算法,该算法采取水印置乱变换,对剪切的攻击具有较强的鲁棒性。王忠等人^[3]提出将置乱的水印信息嵌入到 Lab 色彩空间的亮度 L 分量的小波系数上的水印算法,该算法具有较强的鲁棒性和不可见性,但对旋转攻击,其鲁棒性一般。

为克服上述缺点,本文提出 BEMD 和位平面分解相结合

的水印嵌入算法,并利用人类视觉系统和 Arnold 置乱变换对相关系数进行处理,通过 Lab 颜色空间实现水印的嵌入。实验表明,算法对 JPEG 压缩、旋转、高斯噪声、椒盐噪声和中值滤波及剪切等攻击具有较强的抗攻击性。

1 算法思想

1.1 Lab 颜色空间

Lab 颜色空间^[4,5]是在 1913 年国际照明委员会(CIE)制定的颜色度量国际标准的基础上建立的一种颜色模型,是惯常用来描述人眼可见的所有颜色最完备的,它的设计用来接近人类视觉,在感知均匀性上优于其他颜色空间,是与设备无关的系统模型,其中 L 是亮度分量, a 和 b 是颜色对立分量。

本文利用其感知均匀性和与设备无关的特性,把宿主图像从 RGB 空间转换为 Lab 颜色空间,实现水印信息的不可见性最大化。

1.2 BEMD 算法

Huang 等人于 1998 年提出的经验模态分解(EMD)算法,用于分析非线性、非平稳信号序列,是根据信号的局部特征,自适应地将其分解为频率高低不同、局部窄带的各个分量,称为

收稿日期: 2013-07-15; 修回日期: 2013-08-29

基金项目: 新疆维吾尔自治区自然科学基金资助项目(2011211A010)

作者简介: 王小伟(1987-),男,安徽阜阳人,硕士研究生,主要研究方向为通信与信息系统(wxw0602@163.com);赖惠成(1963-),男,新疆乌鲁木齐人,硕导,博士,主要研究方向为网络与通信系统;龚金辉(1970-),男,新疆库尔勒人,讲师,工学硕士,主要研究方向为计算机网络与通信、网络安全;张慧(1988-),女,新疆塔城人,硕士研究生,主要研究方向为数字图像处理。

筛分过程。此过程会把一信号分解为多个固有模态函数和一个剩余量(residue)。

很快,这种一维信号的分析方法成功运用到二维信号处理领域,称之为二维经验模态分解算法^[6~9]。其原理是,先计算二维图像信号局部极值点,然后对极值点作曲面拟合,得到上包络面和下包络面,再对两个包络面求均值包络面,最后通过对各个局部均值包络面求算法终止条件SD,即要求图像所有极值点小于两个,所以图像最终可表示为分解的多个固有模态函数和一个剩余量之和。

1.3 Arnold 变换

对水印图像进行置乱变换,可以得到在视觉上毫无意义的图像,从而提高水印信息的安全性和鲁棒性。Arnold 置乱变换方法简单,易于实现。对一幅图像来说,可以把它看成一个矩阵,其元素值就是图像的像素值。 $L \times L$ 大小的图像,其坐标 (x, y) 上的像素值经 Arnold 变换移到坐标 (x', y') 上^[10],其中 $x, y \in (0, 1, \dots, L-1)$,其公式表达为

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \pmod{L}$$

而该变换具有周期性,为避免攻击者的攻击,在变换过程中,变换迭代次数 K 不能以周期的整数倍来作为其变换的一个密钥。

1.4 位平面分解

位平面分解^[11,12]是指把一幅灰度图像的像素值化成二进制的值,所有对应权位值(0 或 1)构成的平面称为位平面。即图像的所有像素都化成 8 位二进制值,可表示为 $b_8 b_7 b_6 b_5 b_4 b_3 b_2 b_1$,所有的 b 位就构成第 1 位平面,依此类推,一幅图像就分解为 8 个位平面。

1.5 嵌入位置的选择

水印信息嵌入位置选择的正确与否,直接影响着水印图像的鲁棒性和不可感知性的好坏。根据人类视觉系统原理,水印嵌入低频系数,鲁棒性好;水印嵌入高频系数,不可感知性好^[13]。为平衡这两点,本文以对宿主图像的 Lab 空间的 L 分量为例进行 BEMD 分解,得到 7 个 IMF 和 1 个剩余量 residue,如图 1 所示。

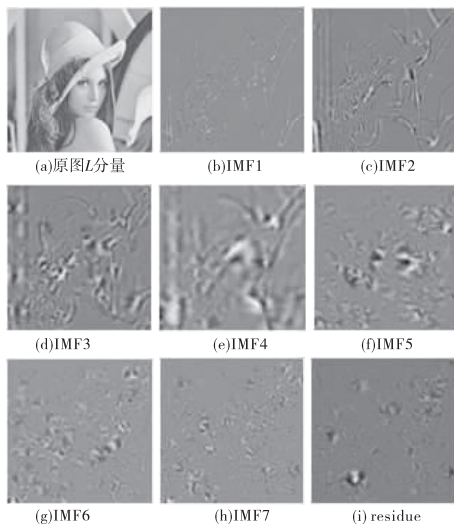


图1 原图 L 分量及其固有模态函数、剩余量

将原图各分量分别减去自身 BEMD 分解的各个 IMF, 分别可以得到 8 幅除相应 IMF 以外的图像,再用峰值信噪比

(PSNR)将之与对应原图各分量求值,如图 2 所示。

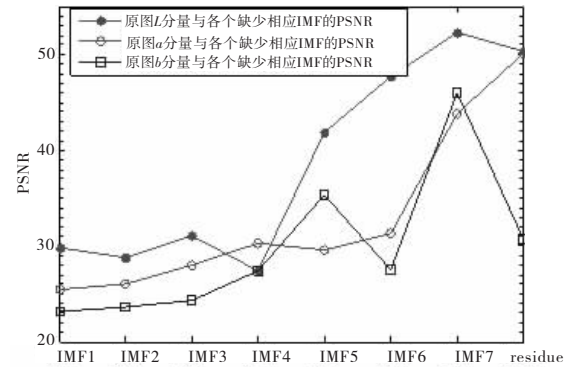


图2 缺少相应 IMF 的图像与原图各分量的 PSNR 值

峰值信噪比值越高,不可见性越强。由图 2 可知,原图 L 分量缺少 IMF7、原图 a 分量缺少 residue 和原图 b 分量缺少 IMF7 的图像分别与各自原图分量最接近,由此可以把水印信息嵌入原图 L 分量的 IMF7 上、原图 a 分量的 residue 上和原图 b 分量的 IMF7 上,增强水印信息的不可见性。

2 算法描述

本文选取 $M \times M$ 的彩色图像作为宿主图像 I , 将其转换成 Lab 颜色空间的 $L_I, a_I, b_I, N \times N$ 彩色图像作为水印信息图像 W , 对其三色分离为 R_W, G_W, B_W 。下面介绍其中一个分量的算法描述,另外两个分量类似进行,然后进行颜色空间逆变换,从而实现彩色图像的水印嵌入和提取。

2.1 水印的嵌入

a) 对水印 R_W 分量进行 Arnold 变换置乱(密钥为 K_1) 处理得到 W_R 。

b) 对置乱图像 W_R 进行位平面分解处理,从第 1 位平面到第 8 位平面分别记为 $B_1, B_2, \dots, B_8$ 。

c) 对宿主图像 L_I 分量进行 BEMD 分解,得到 n 个 IMF 和 1 个 residue,其中,必有一个缺少 IMF 的图像与原图 L_I 分量最相似的。首先对这个 IMF 进行 Arnold 置乱变换(密钥为 K_2),然后再进行离散小波变换(DWT),得到中低频分量 CH1、CV1,再分别对这两个分量进行离散小波变换,得到 CA21、CH21、CV21、CD21 和 CA22、CH22、CV22、CD22。

d) 根据上述理论,实现对水印的嵌入规则如下: $B_8 \rightarrow CA21, B_7 \rightarrow CA22, B_6 \rightarrow CH21, B_5 \rightarrow CH22, B_4 \rightarrow CV21, B_3 \rightarrow CV22, B_2 \rightarrow CD21, B_1 \rightarrow CD22$ 。

以 B_1 嵌入 CD22 为例进行说明,其他照此进行嵌入:计算 CD22 的元素 $CD22(i, j)$ 8 邻域的平均值 $E_1(i, j)$ 和方差 $D_1(i, j)$ (其中, $1 \leq i, j \leq N$, 下同),嵌入式为

$$CD22_W = \begin{cases} CD22 + D_1(i, j) \times |E_1(i, j)| & \text{if } B_1(i, j) = 1 \\ CD22 - D_1(i, j) \times |E_1(i, j)| & \text{if } B_1(i, j) = 0 \end{cases}$$

e) 对 8 个嵌有水印信息的频率分量进行离散小波反变换(IDWT)得到两个中低频分量 $CH1_W, CV1_W$,然后再对其进行一次离散小波反变换得到置乱的 IMF,最后把利用密钥 K_2 反置乱的 IMF 与缺少嵌入前的 IMF 的图像进行合并,得到含有水印的宿主图像 L 分量 L_{IW} 。

2.2 水印的提取

a) 对含有水印的宿主图像 L 分量 L_{IW} 重复水印嵌入过程的步骤 c), 得到 $CA21_L, CH21_L, CV21_L, CD21_L$ 和 $CA22_L, CH22_L,$

CV22_L、CD22_L。于是可得

$$B_{1W}(i,j) = \begin{cases} 1 & \text{if } CD22_L(i,j) > CD22(i,j) \\ 0 & \text{if } CD22_L(i,j) < CD22(i,j) \end{cases}$$

其他位平面按此方法提取即可得到。

b) 将提取的8个位平面进行重构,得到置乱后的水印 W_w 。

c) 用密钥 K_1 对 W_w 进行 Arnold 置乱反变换,最终得到提取出来的水印 R'_w 。

3 实验仿真

本文以 MATLAB R2009a 为实验平台,以 512×512 的 Lena 彩色图像为宿主图像, 128×128 的彩色图像为水印图像来对算法进行仿真实验。密钥 $K_1 = 45$, $K_2 = 56$, $SD = 0.25$ 。实验结果如图3所示。



图3 水印嵌入和提取算法的效果对比

本文采用峰值信噪比(PSNR)对嵌有水印的图像进行失真度测评,体现不可感知性;采用归一化相关性系数(NC)对原始水印与提取出来的水印进行相似度测评,体现鲁棒性。由图3可知,算法具有很好的不可感知性,其 $PSNR = 46.1706$ dB,未受攻击下的 $NC = 0.9994$ (其值的大小是各个分量提取水印的 NC 平均值,下同)。表1为含有水印的图像经过 JPEG 压缩、旋转、高斯噪声、椒盐噪声、中值滤波和剪切的攻击之后相应的参数。

表1 攻击后的图像、提取的水印及其相似度对比

攻击方式	攻击后图像	提取的水印	NC
JPEG 压缩 80%			0.9988
旋转 30°			0.9488
0.001 高斯噪声			0.9921
0.01 椒盐噪声			0.9975
5×5 中值滤波			0.9858
剪切 1/9			0.9972

为了直观有效地检测本文算法的好坏,表2就本文和文献[1]遭受各种攻击后水印相似度进行对比。数据显示,本文算

法在无攻击、高斯噪声、中值滤波和剪切等攻击中具有更强的鲁棒性。尤其在旋转攻击中,在旋转 10° 时,水印信息仍具有很高的相似度,明显优于文献[1]的鲁棒性。

表2 各种攻击后水印相似度(NC)与文献[1]对比

攻击方式	本文	文献[1]
无攻击	0.9994	0.9986
高斯噪声(0,0.005)	0.9635	0.9453
旋转 10°	0.9859	0.6570
3×3 中值滤波	0.9960	0.9933
剪切 1/4	0.9773	0.9629

4 结束语

本文在水印信息的不可感知性上,利用人类视觉系统的特性,选择适合水印嵌入的最佳位置;在鲁棒性上,采用 Arnold 变换对固有模态函数和水印图像进行置乱处理,进一步提高水印嵌入位置复杂度和水印信息无序化水平,从而提高了水印图像的版权保护能力。计算嵌入位置8邻域的平均值和方差作为嵌入的强度和步长,确保在不影响嵌入水印信息图像的视觉效果情况下,尽可能提高水印的相似度。通过实验仿真,该算法具有较强的鲁棒性,在遭受各种攻击后,提取出来的水印相似度也是很高的。然而,本文在水印检测方面仍需要原始图像作为密钥,在以后的研究中,需往盲水印方面学习和考虑。

参考文献:

- [1] 李小满,李峰,章登勇.基于二维经验模式分解的图像水印嵌入算法[J].计算机工程,2011,37(12):119-121.
- [2] 冯茂岩,冯波,沈春林.基于分块 DCT 变换和 Arnold 置乱的自适应图像水印算法[J].计算机应用,2008,28(1):171-173.
- [3] 王忠,黄华文,陈海清.基于 Lab 色彩空间和 DWT 的数字水印算法[J].武汉理工大学学报:信息与管理工程版,2006,28(6):18-20.
- [4] HU Juan-li, DENG Jia-bing, ZOU Shan-shan. A novel algorithm for color space conversion model from CMYK to LAB[J]. Journal of Multimedia, 2010, 2(5):159-166.
- [5] 陈昌涛,仇国庆,杨平,等. Lab 空间色彩分割在快速车牌定位中的应用[J].计算机应用研究,2010,27(8):3191-3193.
- [6] BENKUIDER A, AARAB A. Content based image retrieval using the generalized gamma density to model BEMD's IMF's[J]. Journal of Computers, 2011, 6(6):1168-1174.
- [7] 高凤娇,何艳,田晓英,等.基于 BEMD 图像特征点的图像压缩方法[J].自动化技术与应用,2012,31(8):16-19.
- [8] 戴小文,魏志强,苟先太.基于改进 BEMD 的视频镜头转场检测算法研究[J].光子·激光,2010,21(2):270-273.
- [9] 张俊,黎明,鲁宇明,等.基于 BEMD 的疲劳断口图像分割[J].失效分析与预防,2011,6(2):70-74.
- [10] SAXENA D. Digital watermarking algorithm based on singular value decomposition and Arnold transform[J]. International Journal of Electronics and Computer Science Engineering, 2012, 1(1):22-27.
- [11] FRAZ M M, BASIT A, BARMAN S A. Application of morphological bit planes in retinal blood vessel extraction[J]. Digit Imaging, 2013, 26(2):274-286.
- [12] 谭永杰,马苗.位平面与 Gray 码相结合的图像置乱方法[J].计算机工程与应用,2010,46(16):174-177.
- [13] COX I J, KILLIAN J, LEIGHTON F T, et al. Secure spread spectrum watermarking for multimedia[J]. IEEE Trans on Image Processing, 1997, 6(12):1673-1687.