

基于混沌和 BEMD 分解的小波域彩色图像数字水印算法

刘程浩¹, 柏森¹, 刘博文¹, 徐庶²

(1. 重庆通信学院, 重庆 400035; 2. 71426 部队, 河南 焦作 415000)

摘要: 提出了一种基于离散小波变换、混沌系统和二维经验模式分解的彩色图像数字水印算法。首先,对彩色载体图像的 G 通道进行一级小波分解,将其低频分量进行混沌位置置乱;然后将置乱后的低频分量进行二维经验模式分解,分解成 5 个基本模式分量和 1 个残差分量;最后,用水印信息代替第 4 个中低频基本模式分量实现信息嵌入。利用归一化互相关函数和峰值信噪比对算法进行评定,并对含水印的图像进行攻击。实验结果表明,该算法嵌入容量较大,且具有较好的透明性和鲁棒性。

关键词: 数字水印;混沌系统;二维经验模式分解;离散小波变换

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2011)11-0045-04

A color image watermarking algorithm in DWT domain based on chaos system and BEMD

Liu Chenghao¹, Bai Sen¹, Liu Bowen¹, Xu Shu²

(1. Chongqing Communication Institute, Chongqing 400035, China; 2. 71426 Troops, Jiaozuo 415000, China)

Abstract: A watermarking algorithm based on chaos system and BEMD is presented to embed watermark in color image. Firstly the G channel of host color image is decomposed by wavelet transform and its low frequency components are scrambled by the chaos system. Then the scrambled low frequency components is decomposed into five IMF and a residue by BEMD. Finally, watermark is embedded by replacing the four intermediate frequency IMF components with the watermark. The algorithm was assessed by the normalization function and the PSNR, and the watermarked color image is attacked. Experimental results show that the watermarked color image has a high capacity of watermark information hiding, better imperceptibility and robustness.

Key words: digital watermark; chaos system; BEMD; DWT

数字图像水印发展非常迅速,数字图像数据的版权保护也显得越来越重要。通过在数字图像载体中嵌入水印,可以实现盗版确认、使用跟踪等功能。以数字图像为载体的经典的信息隐藏算法基本可以分为两类:时域算法和变换域算法。时域算法的主要代表有 LSB 算法^[1],其算法比较简单、容量大,但是鲁棒性差。目前,变换域算法由于对视觉影响小,鲁棒性好而受到研究者的重视。研究的方向主要集中在 DCT 变换^[2-3]、DFT 变换域^[4-5]、DWT 变换^[6-7]及其他正交域^[8]。虽然变换域算法的鲁棒性普遍比空域算法好,但变换域的算法容量普遍较小,无法和空域算法容量相比。参考文献[9]提出了一种基于 BEMD (Bidimensional Empirical Mode Decomposition) 分解^[10]的数字水印算法,该算法达到了空域 LSB 算法容量水平,并对椒盐噪声、缩放、小波变换

实现的压缩有一定的抵抗能力,但其基本不具有抗 JPEG 压缩攻击的能力。另外,由于 BEMD 分解的系数取值空间有限,进而使其密钥空间很小,导致该水印算法的安全性不高。

针对参考文献[9]算法的不足,本文以彩色图像 G 通道信号为载体,利用 HVS 系统对绿色的不敏感性,提高算法的不可感知性;利用 DWT 变换鲁棒性的优点,提高算法的鲁棒性;利用混沌系统对初值的敏感性,提高算法的安全性^[11];利用二维混沌置乱的高效性,提高 BEMD 分解的有效性,同时置乱增加了图像分解后中低频幅度频谱强度,提高了算法抗 JPEG 压缩攻击的能力^[12]。实验结果表明,本文提出的改进算法容量依然很大,可达到空域 LSB 算法四分之一的水平,显著增强了其抗 JPEG 压缩攻击能力,同时提高了算法的安全性。

《微型机与应用》2011 年第 30 卷第 11 期

1 混沌序列

混沌现象是在非线性动力系统中出现的确定性的、类似随机的过程。这种过程既非周期,又不收敛,并且对初始值有极其敏感的依赖性。

一个一维离散时间非线性动力系统定义如下:

$$x_{k+1}=f(x_k) \quad (1)$$

其中, $x_k \in v=(0,1), k=0,1,2,3,\dots$, 称之为状态。而 $f: v \rightarrow v$ 是一个映射, 将当前状态 x_k 映射到下一个状态 x_{k+1} , 如果由初始值 x_0 开始, 反复应用 f , 就得到一个序列 $\{x_k, k=0,1,2,3,\dots\}$, 这一序列称为该离散时间动力系统的一条轨迹。

既非常简单又被广泛研究的动力系统是 Logistic 映射, 其定义如下:

$$x_{k+1}=ux_k(1-x_k) \quad (2)$$

其中, $0 \leq u \leq 4$ 称为分枝参数, $x_k \in (0,1)$ 。当 $3.569\ 945\ 6 \leq u \leq 4$ 时, Logistic 映射工作处于混沌状态。也就是说, 由初始条件 x_0 在 Logistic 映射的作用下所产生的序列 $\{x_k, k=0,1,2,3,\dots\}$ 是非周期、不收敛的, 且对初始值非常敏感。Logistic 序列的特性表明, 混沌动力系统具有一定的确定性, 其遍历统计特性等同于白噪声, 具有形式简单、对初始条件敏感等诸多特性^[13]。

2 二维经验模式分解

HUANG N E 提出将原始信号分解为一些不同 IMF (Intrinsic Mode Functions) 分量之和, 并对分解后得到的 IMF 分量进行 Hilbert 变换, 获得分量的瞬时频率和振幅, 即 Hilbert 谱^[14]。物理上定义一个有意义的瞬时频率所需要的条件是具有局部均值为零的对称性, 并且具有相同的零交叉和极值数目。因此, HUANG N E 给出的 IMF 定义满足以下两个条件:

(1) 在整个信号数据段内, 极值点的个数和过零点的个数必须相等或最多相差一个。

(2) 在任何一点, 由局部极大值点形成的上包络线和由局部极小值点形成的下包络线的均值为 0。

EMD 分解基于如下假设:

(1) 信号至少有两个极值, 即一个极大值和一个极小值。

(2) 信号特征时间尺度由两个极值之间的时域信号的下降沿定义。

(3) 当整个数据序列没有极值点而只有拐点时, 能够在进行一阶或几阶运算后重建极值点。

几乎所有的信号都是非线性、非稳态的, 它们不满足构成 IMF 的条件。因此, 需要采用筛选算法, 将复杂信号分解为若干个 IMF 之和。

对于一个二维 $m \times n$ 图像信号 $f(x, y), x=1, 2, \dots, m; y=1, 2, \dots, n$ 。BEMD 分解^[14]的实现过程如下:

(1) 外部初始化, 令待处理的图像为:

$$r_0=f(x, y), j=1$$

(2) 筛分抽取第 j 个 IMF:

① 内部初始化: $h_0(x, y)=r_{j-1}(x, y), k=1$ 。

② 利用形态学算法或者 8 邻域像素, 找出 h_{k-1} 中的极大值和极小值点。

③ 分别对极大值和极小值点进行包络拟合, 形成二维图像上包络曲面 $Envelope_{\max}(x, y)$ 和下包络曲面 $Envelope_{\min}(x, y)$ 。

④ 确定均值包络:

$$\text{mean}(x, y)=[Envelope_{\max}(x, y)+Envelope_{\min}(x, y)]/2$$

⑤ 从图像中减去均值得到:

$$h_k(x, y)=h_{k-1}(x, y)-\text{mean}(x, y)$$

理想情况下, $h_k(x, y)$ 应该是一个基本模式分量。然而, 对非线性、非平稳数据而言, 包络均值可能不同于真实的局部均值, 一些非对称波依然存在。

⑥ 计算终止条件, 若满足 IMF 条件, 则有: $c_j=h_k(x, y)$; 否则令 $k=k+1$, 转到第②步。

(3) 求残差量 $residue$:

$$r_j(x, y)=r_{j-1}(x, y)-c_j(x, y)$$

若 $r_j(j=j+1)$ 中仍有不少于两个的极值点或者分解所得的 IMF 数目未达到要求, 则将 r_j 看做新的数据, 转到(2)。

(4) 最后得到的 BEMD 分解结果是:

$$f(x, y)=\sum_{j=1}^n c_j(x, y)+r_n(x, y) \quad (3)$$

式中, $f(x, y)$ 为要合成的图像信号, $c_j(x, y)$ 是分解得到的第 j 个 IMF 分量, n 为分解的 IMF 分量个数, $r_n(x, y)$ 为最终的残余分量。

IMF 的第 2 个限定条件只是一种理论上的要求, 在实际筛选过程中, 很难保证图像信号的局部均值绝对为零。如果完全按照上述两个限定条件判断分离出的分量是否为基本模式分量, 很可能需要过多的重复筛选, 从而导致基本模式分量变成具有很大幅度的纯粹调制信号。为了保证基本模式分量保存足够的反映物理实际过程的幅度与频率调制, 必须确定一个筛选过程的停止标准。筛选过程的停止标准可以通过限制两个连续相邻的处理结果的标准差决定, 即:

$$SD=\sum_{x=1}^n \sum_{y=1}^m \left[\frac{|r_i(x, y)-r_{i+1}(x, y)|^2}{r_i^2(x, y)} \right] \quad (4)$$

直到 $SD < SD_{\max}$, 一个基本模式分量被分解出来。其中 $SD_{\max} \in [0.1, 0.5]$ 是自选阈值。(在编程实现过程中为了避免某次筛选过程迭代次数趋于无穷, 自行限定一个最大的迭代次数, 本文实验取 10 000 次)

3 水印嵌入算法

假设载体图像为 RGB 彩色图像:

$$X=\{g(i, j, q), i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n; q=1, 2, 3\}$$

其中, i 为行数, j 为列数, q 为通道。根据 HVS 理论, 将 G 通道进行水印嵌入:

$$I=\{g(i, j, q)\}$$

(1)离散小波变换

用“db1”小波基对G通道载体图像I进行DWT变换： $[LL_1, HL_1, LH_1, HH_1]=DWT(I)$ ，其中 LL_1 为低频子带。

(2)Logistic混沌序列置乱

根据式(2)，Logistic迭代方程构造二维Logistic混沌映射：

$$x=\{x(i), i=1, 2, \dots, k \times l\}$$

$$y=\{y(j), j=1, 2, \dots, k \times l\}$$

其中， $u_1=0.89$ ， $u_2=0.89$ （式(2)中的系数）， $x(1)=0.99$ ， $y(1)=0.02$ 。

利用 x 、 y 对 LL_1 进行位置置乱得到 $LL_{1scramble}$ ：

$$LL_{1scramble}=\{LL_1(i, j), i=1, 2, \dots, k; j=1, 2, \dots, l\}$$

其中， k 、 l 分别为低频子带矩阵行和列数。

(3)用水印图像替换 $LL_{1scramble}$ BEMD分解得到的第5个IMF分量。

根据第2节的方法对 $LL_{1scramble}$ 进行BEMD分解，取 $SD_{max}=0.5$ ，得到：

$$LL_{1scramble}(x, y)=\sum_{j=1}^n c_j(x, y)+r_n(x, y) \quad (5)$$

其中， $x=1, 2, \dots, k$ ； $y=1, 2, \dots, l$ ； $n=5$ 。

读取水印图像：

$$w=\{w(x, y), i=1, 2, \dots, k; j=1, 2, \dots, l\}$$

将 w 替换 C_{n-1} 得到嵌入水印的低频子带为：

$$LL'_{1scramble}(x, y)=\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq n-1}}^n c_j(x, y)+q \times w+r_n(x, y) \quad (6)$$

其中， $x=1, 2, \dots, k$ ； $y=1, 2, \dots, l$ ； $n=5$ ， q 为嵌入强度取值为10。

(4)Logistic混沌序列反置乱

利用步骤(3)中的Logistic混沌映射将 $LL'_{1scramble}$ 进行反置乱恢复得到 LL'_1 。

(5)利用小波基重构嵌入水印的I

将嵌入水印的低频子带 LL'_1 和其他原始3个子带，用“db1”小波进行反离散小波变换对信号进行重构，重构得到含有水印的G通道图像信号：

$$I'=IDWT[LL'_1, HL_1, LH_1, HH_1]$$

4 水印提取算法

水印提取时需要原始的载体图像，提取过程如下：

(1)离散小波变换。使用“db1”小波基分别对原始彩色图像 X 和待检测彩色图像 X^* 的G通道信号 I 和 I^* 进行一级小波分解，并提取各自的低频子带系数矩阵 LL_1 和 LL_1^* 。

(2)Logistic混沌序列置乱。按照水印嵌入算法步骤(2)中的Logistic混沌置乱方法分别对 LL_1 和 LL_1^* 进行置乱得到 $LL_{1scramble}$ 、 $LL'_{1scramble}$ 。

(3)水印提取。

$$w^*=(LL_{1scramble}^*-LL_{1scramble}+IMF_{n-1})/q \quad (7)$$

式中， IMF_{n-1} 是 $LL_{1scramble}$ 按照水印嵌入算法步骤(3)中的方法进行BEMD分解得到。

5 实验结果

实验采用Lena(256×256)彩色图像作为原图像，原水印信息为128×128的二值图像。结果表明，这种算法的不可见性很好，如图1所示。实验计算得峰值信噪比 $PSNR=34.5405$ dB，也说明算法的透明性很好。算法抗攻击的测试结果如表1所示，图2所示的是JPEG压缩因子为70时，提取水印和原始水印的对比。



图1 原始图像与含有水印图像

表1 鲁棒性攻击检测结果及算法比较^[9]

攻击类型	NC系数		
	文献[9]方法	本文算法	
未攻击	攻击1次	攻击1次	
	90	0.9602	
	80	0.9359	
	70	0.8774	
	60	0.8116	
JPEG压缩攻击 (压缩因子)	50	0.7691	
	40	0.7108	
	30	0.6610	
	缩放攻击(nearest方法5倍缩放)	0.9477	0.9978
	0.02椒盐噪声	0.9162	0.9335
旋转30°	0.1354	0.1463	
混沌错误密钥(相差0.00001)	未提	0.0734	



图2 原始水印信息与提取水印信息

(JPEG压缩因子70)

本文提出基于小波变换(DWT)、混沌映射和BEMD分解数字水印算法，首先根据HVS系统对绿色敏感度低的特点以及小波变换抗压缩攻击的特点，使用小波基将原始彩色载体图像的G通道图像信号整体进行一级小波分解。然后为了提高算法的安全性和中频分量的强度，对原始G通道图像信号小波分解得到的近似分量，进行Logistic二维混沌位置置乱，再对置乱后得到的近似分量进行BEMD分解。为了提高抗算法的鲁棒性，选取替换中低频的IMF分量进行水印嵌入，充分利用了图像的冗余空间，使鲁棒性和不可感知性达到了比较好的平衡。实验表明，该算法容量大，当载体图像为256×256时，嵌入的容量为128×128 bit参考信息。同时该算法能够抵抗噪声、缩放、JPEG压缩的攻击，与参考文献[9]算

法相比,本文算法的抗 JPEG 压缩攻击的鲁棒性有了明显的提高。然而这种信息算法还存在两个问题:一是不能抵抗旋转攻击和剪切攻击;二是算法是非盲的,即水印提取时需要原始载体图像。如何解决这些问题将是下一步算法改进研究的重点。

参考文献

- [1] VAN S R, GTIRKEL A, Z'OSBORNE C F. A digital watermark [C]. IEEE International Conference on Image Processing Austin Texax USA, 1994:86-90.
- [2] COX I J. Secure spread spectrum watermarking for multimedia [J]. IEEE Transaction on Image Processing, 1997, 6(12): 1673-1687.
- [3] 黄继武, SHI Y Q, 程卫东. DCT 域图像水印: 嵌入对策和算法[J]. 电子学报, 2000, 28(4): 57-60.
- [4] SOLACHIDIS V, PITASI. Circularly symmetric watermark embedding in 2D DFT domain [J]. IEEE Transaction on Image Processing, 2001, 10(11): 1741-1753.
- [5] 王向阳, 邬俊, 侯丽敏. 一种基于图像特征点的数字水印嵌入方法[J]. 电子学报, 2007, 35(7): 1318-1322.
- [6] 柏森, 胡中豫, 吴乐华, 等. 通信信息隐匿技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [7] 李智, 陈孝威. 小波和余弦变换相结合的灰度图像水印算法[J]. 中国图象图形学报, 2006, 11(6): 834-839.
- [8] FALKOWSKI B J. Multi-polarity complex Hadamard transforms for phase watermarking algorithm [C]. 2007 6th International Conference on Information Communications & Signal Processing, 2007: 1-5.
- [9] 张学敏, 平子良, 赵志芳. 基于经验模式分解的信息隐藏研究 [J]. 内蒙古师范大学学报 (自然科学汉文版), 2010, 39(3): 252-256.
- [10] NUNES J C, BOUAOUNE Y, DELECHELLE E, et al. Image analysis by bidimensional empirical mode decomposition [J]. Image Vis Comput(S0262-8856), 2003, 21: 1019-1026.
- [11] 陈巧琳, 廖晓峰, 陈勇, 等. 改进的基于混沌序列的幻方变换图像加密[J]. 计算机工程与应用, 2005, 22(5): 138-139.
- [12] 谢建全, 阳春华, 黄大足, 等. 一种大容量的 DCT 域信息隐藏算法[J]. 中国图象图形学报, 2009, 14(8): 1542-1546.
- [13] 易开祥, 孙鑫, 石教英. 一种基于混沌序列的图像加密算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2000, 12(9): 672-676.
- [14] HUANG N, ZHENG S, LONG S, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and nonstationary time series analysis [J]. Process Royal Society Lond., 1998, A454: 903-995.

(收稿日期: 2011-01-14)

作者简介:

刘程浩, 男, 1984 年生, 硕士研究生, 主要研究方向: 图像信息隐藏, 数字音频水印。

柏森, 男, 1963 年生, 博士后, 教授, 硕士研究生导师, 主要研究方向: 信息隐藏, 掩密通信, 图像处理, 模式识别。

刘博文, 男, 1983 年生, 硕士研究生, 主要研究方向: 图像信息隐藏, 数字音频水印。