

萤火虫算法优化的的小波域图像水印技术

王世辉,王仪明,武淑琴,田 贝

(北京印刷学院 数字化印刷装备北京市重点实验室,北京 102600)

摘 要: 针对水印不可感知性和鲁棒性难均衡的问题,提取一种萤火虫算法优化的的小波域图像水印新方法. 首先对原始载体图像进行 2 级 Haar 离散小波变换(DWT),分别对得到的第 2 级逼近子图 LL_2 、垂直细节子图 LH_2 、水平细节子图 HL_2 运行奇异值分解(SVD),作为水印嵌入位置. 然后对水印图像进行 Arnold 置乱加密和 1 级 Haar DWT,分别对得到的逼近子图 LL_1 、垂直细节子图 LH_1 、水平细节子图 HL_1 运行 SVD,作为待嵌入信息. 最后采用萤火虫算法(FA)得到水印嵌入的最优强度因子. 实验表明,此算法可较好均衡图像水印的不可感知性和鲁棒性.

关键词: 图像水印;萤火虫算法;离散小波变换;鲁棒性;不可感知性

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2018)05-0124-04

A Watermarking Method in Wavelet Domain Optimized by Firefly Algorithm

WANG Shi-hui, WANG Yi-ming, WU Shu-qin, TIAN Bei

(Beijing Key Laboratory of Digital Printing Machinery, Beijing Institute of Graphic
Communication, Beijing 102600, China)

Abstract: A new method of image watermarking in wavelet domain optimized by Firefly Algorithm is proposed to solve the problem that it is difficult to balance imperceptibility and robustness in watermarking. Firstly, the two layer Haar discrete wavelet transform(DWT) is applied on original host image, then singular value decomposition (SVD) is applied to the obtained second-level approximation subgraph LL_2 , vertical detail subgraph LH_2 and horizontal detail subgraph HL_2 , which are taken as the watermark embedding position. Then, the watermarking image is processed by Arnold transform and one layer Haar DWT. The SVD is applied to the obtained approximation subgraph LL_1 , vertical detail subgraph LH_1 and horizontal detail subgraph HL_1 , which are taken as the information to be embedded. Finally, the optimal intensity factor of watermarking embedding is obtained by using Firefly Algorithm(FA). The experimental results show that the proposed algorithm can well balance the imperceptibility and robustness of the image watermarking.

Key words: image watermarking; Firefly Algorithm; discrete wavelet transform; robustness; imperceptibility

1 引言

作为信息隐藏技术的重要分支,数字水印技术是保护图像、音频和视频等多媒体信息安全的重要手段,在隐蔽通信、广播监视、版权保护等领域被广泛应用^[1-3]. 由于不可感知性和鲁棒性存在相互制约的关系,数字水印特性间易产生不平衡问题. 因此,

良好的数字水印算法应既能保证较好的不可感知性,又具有较强的抗攻击能力. DWT 结合 SVD 的算法具有嵌入量大、鲁棒性更好等优点,因而受到广泛关注. 任小康等^[4]通过 DWT-SVD 的技术将彩色水印信息嵌入到彩色载体图像,但其嵌入系数为给定值,易造成鲁棒性和不可感知性的不平衡. 余香敏等^[5]选取 3 级低频逼近子图 LL_3 作为嵌入位置进行

SVD,舍弃最大奇异值后嵌入水印. 由于算法具有的虚警性高缺陷,易在水印提取时产生误判. 李林静等^[6]对水印信息进行 Arnold 置乱加密预处理,提高水印保密性. 在 DWT-SVD 的基础上引入分块及量化思想,实现了良好的不可感知性和鲁棒性.

2008 年,剑桥大学 Yang^[7] 提出一种新的群智能优化算法—萤火虫算法(Firefly Algorithm, FA),寻优精度高、收敛速度快,是一种有效的启发式优化算法,但其在水印技术领域鲜为报道. 本文从均衡水印鲁棒性和不可感知性入手,在 DWT-SVD 的基础上,运用 FA 对水印信息的嵌入系数进行搜索,达到优化水印算法的目的.

2 理论基础

2.1 离散小波变换(DWT)

DWT 利用小波的概念把图像从空间域转换到能量集中的小波域. 原始图像经 1 级 DWT 后分为四个频带. 其中,HL(水平)、LH(垂直)、HH(对角)称为细节子图,携带原始图像的边缘和纹理信息,人眼对这些高频信息不敏感. LL 称为逼近子图,集中携带原始图像大部分能量,可继续进行 DWT,分为更多子频带. 图像的 3 级 DWT 如图 1 所示,右侧为利用 MATLAB 仿真 Lena 图像所得结果.

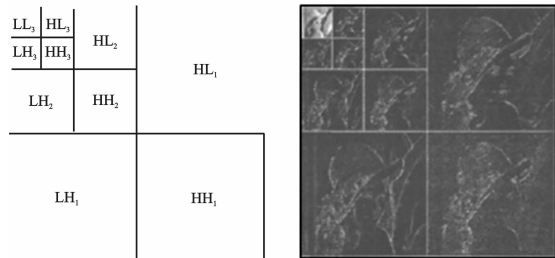


图1 图像3级DWT示意图

2.2 奇异值分解(SVD)

SVD 在很多领域中都有应用,如主成分分析、典型相关分析和数据压缩等. 若一幅二维图像($M \times N$)用矩阵 $\mathbf{A}$ 表示,则 $\mathbf{A}$ 可被表示为:

$$\mathbf{A} = \mathbf{U}\mathbf{S}\mathbf{V}^T \quad (1)$$

式(1)中,矩阵 $\mathbf{U}$ 和 $\mathbf{V}$ 都是 $M \times N$ 的正交矩阵,分别是 $\mathbf{A}$ 的左右奇异向量, $\mathbf{S}$ 为 $M \times N$ 的对角矩阵,是 $\mathbf{A}$ 的奇异值矩阵,其对角线元素满足:

$$S(1,1) \geq S(2,2) \geq \dots \geq S(M,N) \geq 0 \quad (2)$$

因奇异值具有稳定特性,在 $\mathbf{A}$ 受到攻击时,奇异值的变化相对 $\mathbf{A}$ 来讲非常小,因此对图像进行奇异值分解将会提高其抗攻击能力.

2.3 萤火虫算法(FA)

2.3.1 原理介绍

FA 是受萤火虫发光行为启发而提出的智能优化算法,简单、高效,在搜索空间内利用萤火虫的发光特性寻找伙伴,并往邻域范围内位置更优、荧光更亮的伙伴移动,实现位置更新.

标准 FA 有三条理想化约定:

(1)种群不分性别,萤火虫之间的吸引不考虑性别因素;

(2)萤火虫间的吸引度与荧光亮度成正比,荧光亮度低的向亮度高的萤火虫移动;

(3)荧光亮度最高的萤火虫随机移动.

实际问题中,荧光亮度和移动区域取决于给出的适应度函数及其定义区间,算法涉及两个重要因素:荧光亮度和吸引度. 萤火虫荧光亮度由自身所在位置的目标值决定,亮度越高表示处于更优位置,目标值更好. 吸引度与荧光亮度相关,发光越亮的萤火虫吸引力愈强,可吸引邻域范围内亮度比其弱的萤火虫朝自己方向移动. 若发光亮度相同,则萤火虫各自随机移动.

2.3.2 算法过程

FA 中,荧光亮度定义为:

$$L(r) = L_0 e^{-\gamma r_{ij}} \quad (3)$$

式中, L_0 为萤火虫最大荧光亮度,即自身位置处 ($r_{ij} = 0$) 荧光亮度; γ 为光强吸收系数, $\gamma \in [0.01, 100]$; r_{ij} 为萤火虫 i 和萤火虫 j 间的笛卡尔距离,即:

$$r_{ij} = \|X_i - X_j\| = \sqrt{\sum_{k=1}^d (x_{ik} - x_{jk})^2} \quad (4)$$

式中, d 为变量的维数; x_{ik} 为萤火虫 i 在 d 维空间中的第 k 分量.

对于 2 维空间, r_{ij} 可表示为:

$$r_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (5)$$

萤火虫的吸引度定义为:

$$\beta_{ij} = \beta_0 e^{-\gamma r_{ij}} \quad (6)$$

式中, β_0 为最大吸引度,即光源 ($r_{ij} = 0$) 处的吸引度.

萤火虫 i 被荧光亮度更高的萤火虫 j 吸引并向萤火虫 j 移动,则萤火虫 i 的位置更新公式为:

$$x_i(t+1) = x_i(t) + \beta_{ij}(x_j(t) - x_i(t)) + \alpha u_i \quad (7)$$

式中, t 为迭代次数; x_i, x_j 为萤火虫 i 和 j 所处的空间位置; α 为常数,一般可取 $[0, 1]$ 内的数; u_i 是由均匀分布得到的随机数向量,由下式求得:

$$u_i = (\text{rand1} - \frac{1}{2}) \quad (8)$$

若萤火虫 i 的荧光亮度最高, 则其将随机进行位置更新, 公式如下:

$$x_{\max}(t+1) = x_{\max}(t) + \alpha u_{\max} \quad (9)$$

式中 $u_{\max}$ 的计算公式如下:

$$u_{\max} = (\text{rand2} - \frac{1}{2}) \quad (10)$$

式中, $\text{rand1} \approx U(0,1)$, $\text{rand2} \approx U(0,1)$ 都是从均匀分布中取得的随机数, 萤火虫的亮度由适应度函数 $f(x)$ 决定。

3 FA 优化的小波域图像水印技术

FA 优化小波域图像水印技术的原理是把载体图像经 DWT 转换到小波域, 依据小波变换特性和水印隐藏原理选取合适的水印嵌入位置, 随后在嵌入水印时权衡鲁棒性和不可感知性, 确定萤火虫算法的适应度函数 $f(x)$, 指导算法搜索出最优嵌入强度因子, 完成水印嵌入。

3.1 水印图像预处理

为增强水印保密性, 使用 Arnold 变换对水印图像置乱。使用 64×64 的“北京印刷学院”字样的二值图像作为水印图像, 部分 Arnold 变换结果如图 2 所示。其中, n 为置乱次数。

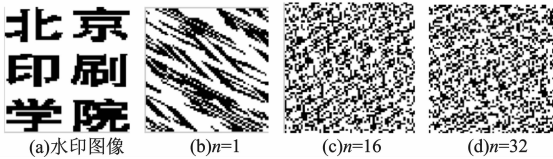


图 2 水印图像部分 Arnold 变换结果

3.2 水印的嵌入

(1) 对载体图像 I 进行 2 级 Haar DWT, 得到第 2 级逼近子图 LL_2 , 垂直细节子图 LH_2 , 水平细节子图 HL_2 , 对上述频带子图分别应用 SVD:

$$A^m = U^m S^m (V^m)^T \quad (11)$$

式中, $m = LL_2, LH_2, HL_2$, $\lambda_i^m (i = 1, 2, \dots, N)$ 为 S^m 的奇异值。

(2) 采用 Arnold 置乱加密水印图像, 对加密后的水印图像 W 进行 1 级 Haar DWT, 得到逼近子图 LL_1 、垂直细节子图 LH_1 、水平细节子图 HL_1 , 对上述频带子图分别进行奇异值分解:

$$W^n = U_W^n S_W^n (V_W^n)^T \quad (12)$$

式中, $n = LL_1, LH_1, HL_1$, $\lambda_i^n (i = 1, 2, \dots, N)$ 为 S_W^n 的奇异值。

$$(3) \lambda_i^{m*} = \lambda_i^m + \alpha \lambda_{W_i}^n \quad (13)$$

式中, α 为萤火虫算法寻优后的水印嵌入强度因子。

根据式(13) 将水印图像频带子图的奇异值嵌入载体图像频带子图的奇异值中。

(4) 由式(13) 得重构后载体图像各频带子图的对角矩阵 S^{m*} , 利用式(14) 得到嵌入水印后的 LL_2^*, LH_2^* 和 HL_2^* 。

$$A^{m*} = U^m S^{m*} (V^m)^T \quad (14)$$

(5) 进行逆离散小波变换(IDWT), 生成嵌入水印图像 I 。

3.3 水印的提取

(1) 对嵌入水印图像 I 进行 2 级 Haar DWT 得到 LL_{I2}, LH_{I2} 和 HL_{I2} 。

(2) 对 $LL_{I2}, LH_{I2}, HL_{I2}$ 应用 SVD:

$$A^p = U^p S^p (V^p)^T \quad (15)$$

式中, $p = LL_{I2}, LH_{I2}, HL_{I2}$, $\lambda_i^p (i = 1, 2, \dots, N)$ 为 S^p 的奇异值。

$$(3) \lambda_{W_i}^q = \frac{(\lambda_i^p - \lambda_i^m)}{\alpha} \quad (16)$$

根据式(16) 求出 Arnold 置乱后水印图像 W 各频带子图的奇异值 $\lambda_{W_i}^q$, $q = LL_{W1}, LH_{W1}, HL_{W1}$, $i = 1, 2, \dots, N$ 。

(4) 求出 $\lambda_{W_i}^q$ 后, 得到 $LL_{W1}, LH_{W1}, HL_{W1}$ 的对角矩阵 S_W^q , 应用 SVD 重构得到图像 W 各频带子图。

$$A_W^q = U_W^q S_W^q (V_W^q)^T \quad (17)$$

(5) 对 A_W^q 应用 2 级 IDWT, 得到置乱后的水印图像 W 。

(6) 通过 Arnold 逆变换得到提取的水印图像 W 。

3.4 FA 优化水印嵌入强度因子

本文利用 FA 来搜索水印嵌入时的最优强度因子, 将峰值信噪比(PSNR)和归一化相关系数(NC)作为算法中鲁棒性和不可感知性的衡量指标。PSNR 通常用来比较载体图像和嵌入水印图像间的质量差异, 其值愈大, 表明水印嵌入算法对载体图像破坏愈小。NC 常用于描述原始水印和提取水印间的近似程度, 其值愈大, 表示提取的水印越接近原始水印。

PSNR 的定义为:

$$\text{PSNR} = 10 \lg \left(\frac{M \times N \times \max I^2(x, y)}{\sum_{x, y} [I(x, y) - \hat{I}(x, y)]^2} \right) \quad (18)$$

NC 的定义为:

$$NC(W,W^*) = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [W(i,j) \times W^*(i,j)]}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [W(i,j)]^2} \tag{19}$$

考虑到水印承受多种类型的攻击,定义以下适应度函数:

$$f(x) = PSNR + \mu * \sum_{i=1}^T NC(W,W_i^*) \tag{20}$$

式中,NC(W,W_i^{*})表示嵌入水印图像承受第*i*种类型攻击时提取水印的归一化相关系数,*i* = 1,2,⋯, *T*.当*i* = 1时,嵌入水印图像未受攻击.μ为NC值的加权因子,用来平衡PSNR和NC对结果的影响.

FA优化小波域图像水印算法流程图如图3所示.

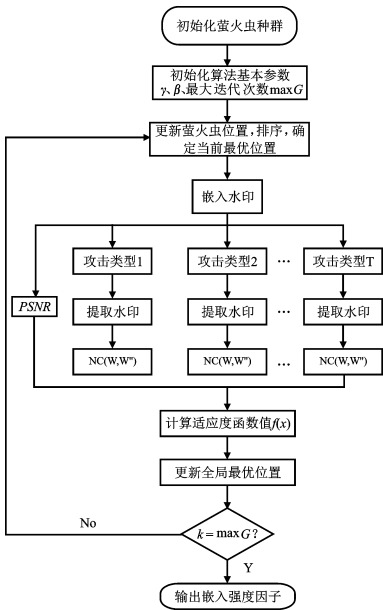


图 3 FA 优化小波域图像水印算法流程图

4 仿真实验

4.1 实验条件

实验室采用 512×512 的 Lena 灰度图像为载体图像,64×64“北京印刷学院”字样的二值图像作为水印图像,实验平台为 MATLAB 2 012 b.采用本文提出的水印优化算法嵌入水印,萤火虫的种群数量 *n* = 20,最大迭代次数 maxG = 100,β₀ = 1,α = 0.01,γ = 1,μ = 10.

4.2 结果与分析

4.2.1 不可感知性测试

载体图像和水印图像及测试结果表明.从人类视觉角度看,两幅图像无明显差异.应用式(18)计算得到 PSNR = 37.085 3 dB.说明本水印算法具有良好的不可感知性.



图 4 载体图像和水印图像及测试结果

4.2.2 鲁棒性测试

常见类型攻击后的嵌入水印图像及提取的水印图像的实验结果进行比较.

对于常见攻击类型,本文水印算法能提取出清晰可见的水印,NC 值均在 0.93 以上,表现出了良好的鲁棒性.图 4(a)为载体图像、图 4(b)为水印图像,与文献[5]进行比较.文献[5]中的水印嵌入强度因子是依据经验值而定,与它的结果进行对比可分析本文算法的性能.统一 6 种水印攻击类型:(1)旋转 45°;(2)添加 *M* = 0, *D* = 0.01 的高斯噪声;(3)剪切左边 1/2;(4)增加 20% 对比度;(5)直方图均衡;(6)JPEG 压缩 30%.实验结果如图 5 所示.

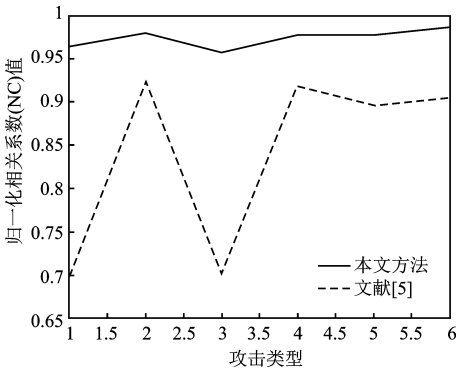


图 5 本文方法与文献[5]方法 NC 值对比

从图 5 可知,本文水印算法对于常见攻击类型的鲁棒性要明显优于文献[5],尤其是具有很强的抗剪切和旋转攻击能力.

5 结束语

在利用 SVD-DWT 的基础上,以均衡水印鲁棒性和不可感知性为目标,提出采用萤火虫算法搜索最优嵌入强度因子的小波域图像水印技术.嵌入水印时,通过 Arnold 变换置乱水印图像,增强水印保密性.实验结果证明,该方法可行、有效,能抗击多种常见水印攻击类型.提取水印过程中,出现了对角线失真的情况,这是下一步要解决的问题.