

最优像素调整耦合基因算法的高容量图像隐写研究^{*}

陈琳¹, 王建鹏²

(1. 泰州学院 计算机科学与技术学院, 江苏 泰州 225300; 2. 南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 南京 210000)

摘要: 针对当前图像隐写方案存在阶梯效应,使其不可感知能力差,且其信息隐藏容量小($\leq 50\%$)等不足,设计了最优像素调整耦合基因算法的高容量图像隐写术。基于 HDWT(Hara discerte wavelet transform)机制,构造隐藏信息长度计算模型,找出图像分块的频域表示,以改善隐写鲁棒性;根据载体图像与隐写图像之间的绝对误差,设计适应度函数,借助基因算法,获取最优映射函数,将秘密信息嵌入到 HDWT 系数中;并设计最优像素变换方案,降低载密图像与载体图像之间的嵌入误差,显著增大隐写容量;再设计其提取机制,获取信息图像;以 PSNR(peak signal to ratio)构建反馈机制,优化提取质量。仿真结果显示:与其他隐写机制相比,该算法具备更大的隐写容量和更强的不可感知性能;拥有更高的检测精度,可有效区分载体与隐写图像特征值。

关键词: 最优像素调整; 高容量图像隐写; 基因算法; 映射函数; 检测精度

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2015)08-2429-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2015.08.044

High capacity image steganography optimize algorithm based on best pixel adjustment and genetic algorithm

Chen Lin¹, Wang Jianpeng²

(1. College of Computer Science & Technology, Taizhou College, Taizhou Jiangsu 225300, China; 2. College of Electronic Engineering & Optoelectronic Technology, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210000, China)

Abstract: In order to solve these defects such as small capacity of information hiding and poor imperceptible performance in current image steganography mechanism, this paper proposed the high capacity image steganography based on optimal pixel adjustment and genetic algorithm. It used HDWT mechanism to find the frequency domain representation of blocks for improving the robustness of steganography. Then it obtained the optimal mapping function by introducing the genetic algorithm to embed the secret message into HDWT coefficients, designed the optimal pixel adjustment algorithm to reduce the error between cover image and stego-image and increase the hiding capacity. Finally, it got the restoration image by the extraction mechanism. And the simulation results show that: comparison with current image steganography mechanism, this algorithm has larger hiding capacity and greater imperceptible performance.

Key words: optimal pixel adjustment; high capacity image steganography; genetic algorithm; mapping function; detection accuracy

0 引言

随着计算机通信技术的迅猛发展,它在国防、医疗以及商业领域得到了广泛发展^[1,2]。因通信介质被用来发送高度机密信息,但由于免费的网络环境,使得这些文件在发送期间,易被通过使用各种编码手法的攻击,导致文件易遭遇到窃听、拦截以及篡改,给接收双方带来极大的安全隐患。为了保证通信安全可靠,诸多学者提出了密码学的分支:隐写术。隐写术已被各个领域作为有效保护机密信息和数字媒体通信不被攻击的新技术,它是一种将重要信息隐藏到某种载体而进行秘密通信的技术^[3,4]。通常,隐写术应满足以下所述的几个必要的要求:(a)强烈的不可感知性能;(b)较高的鲁棒性,可有效抗击失真;(c)简单的检测和提取;(d)高信息容量。

为了更好地保护通信,诸多学者设计了一系列的图像隐写机制。如李明则等人^[5]为改善图像隐写算法的通用性,设计了基于多样特性的 JPEG 图像隐写算法,采用残差共生矩阵与直方图统计函数计算 DCT 域、空域、小波域各域系数(像素)之间的依赖性关系,结合校准方式从中提取特征,并通过实验测试其方法的合理性,结果表明其方法具有理想的检测精度。陈嘉勇等人^[6]确保通信双方能快速同步边信息,同时具有很高的抗检测性能,推广了单调纹理函数思想,构造一种基于自由度的纹理保序函数,提出了基于高效 $\pm k$ 自适应图像隐写术,并测试其算法性能,结果显示其算法具有很高的抗检测性能。梁婷等人^[7]为了提高图像隐写术的隐藏容量和效率,提出了一种基于 NSCT 和人类视觉系统(HVS)的图像隐写方案,并利用实验手段验证其算法的优越性能,结果表明:与小波域相比,其算法具有更高的隐藏容量和较好的隐蔽性能。

收稿日期: 2014-06-09; **修回日期:** 2014-07-24 **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(61101047);教育部博士点基金资助项目(20113219120015)

作者简介: 陈琳(1981-),女,讲师,硕士,江苏泰州人,主要研究方向为计算机图形图像(ChenlinTZ1981@163.com);王建鹏(1980-),男,副教授,硕士,博士,主要研究方向为光电信息技术、图像处理。

然而,上述方法算法的隐藏容量都比较小($\leq 50\%$),且其存在阶梯效应,使其不可感知能力差,安全性不佳。故本文基于 HDWT(Hara discret wavelet transform)机制,找出图像分块的频域表示,以改善隐写算法的鲁棒性;再设计基因算法的适应度函数,获取最优映射函数,将秘密信息嵌入到 HDWT 系数中;并设计最优像素调整算法,降低载密图像与载体图像之间的嵌入误差。最后借助仿真技术测试本文算法性能。

1 HDWT 机制

若尺寸为 $M \times N$ 的 2D 图像 C 的信号为 $S = [S_0, S_1, S_2, \dots, S_{k-1}]$,借助 HDWT 机制(图 1),得到低频部分 $A_{\text{Low}} = [A_0, A_1, A_2, \dots, A_{k/2-1}]$ 和高频信号 $B_{\text{High}} = [B_0, B_1, B_2, \dots, B_{k/2-1}]$:

$$A_i = \lfloor (S_{2i} + S_{2i+1})/2 \rfloor \quad (1)$$

$$D_i = S_{2i} - S_{2i+1} \quad (2)$$

其中: S_i 代表第 i 个像素的信号; $\lfloor \cdot \rfloor$ 为 floor 函数; A_i 代表第 i 个像素对应的低频 HDWT 系数; D_i 代表第 i 个像素的高频 HDWT 系数。

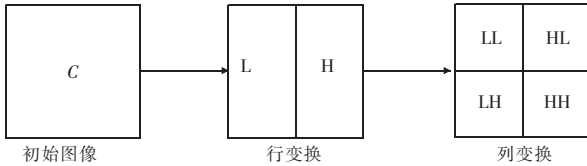


图 1 HDWT 变换示意图

为了防止将秘密信息嵌入到 HDWT 系数中,其像素值超出 $[0, 255]$,本文定义了如下规则:

$$\text{if } F(i, j) \geq 255 - G/2, \text{ 令 } F(i, j) = F(i, j) - G/2 \quad (3)$$

$$\text{if } F(i, j) \leq G/2, \text{ 令 } F(i, j) = F(i, j) + G/2 \quad (4)$$

其中: $F(i, j)$ 代表位置 (i, j) 处的像素值; G 为修改图像直方图的参数,本文取 $G = 30$ 。通过模型(3)~(4)修改图像直方图后,将初始图像分解为 LL1、LH1、HL1、HH1 频带。并构造如下函数来计算每个频带系数的隐藏信息长度:

$$L = \begin{cases} Q = 3 & \text{if } c \geq 2^{Q+3} \\ Q = 2 & \text{if } 2^{Q+2} \leq c < 2^{Q+3} \\ Q = 1 & \text{if } 2^{Q+1} \leq c < 2^{Q+2} \\ Q & \text{if } c > 2^{Q+1} \end{cases} \quad 1 \leq Q \leq 3 \quad (5)$$

其中: L 代表隐藏信息长度; Q 为每个子带中的任何一个系数的最小长度; c 代表子带系数的绝对值。

根据模型(5),将 HDWT 系数分解为四个等级:Level1、Level2、Level3、Level4,也就是高等级可以隐藏信息容量更大。

以图 2(a)为例,将该图像分割成 4×4 个分块,从中择取出第一个 4×4 子块,如图 2(b)所示。从图中可知,第一个 4×4 子块的大部分 HDWT 系数位于 Level4,最终形成的 HDWT 图像如图 2(e)所示。

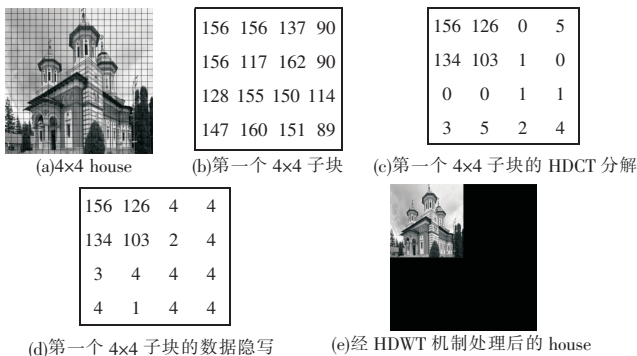


图 2 机制处理

2 最优像素调整方案的设计

为了提高隐写图像提取质量,降低载体图像与隐写图像间的嵌入误差,本文引入 LSB 替代^[8],设计最优像素调整机制。令 P_i, P'_i, P''_i 分别代表载体图像 C 、经 LSB 替代后的载密图像 C' 以及经最优像素调整后的隐写图像中的第 i 个像素值。令 $\delta_i = P'_i - P_i$ 为嵌入误差。根据 LSB 替代^[8]可知,通过直接替代信息长度为 k bit 的 P_i 的 k 个不重要位,来获取 P'_i 。故:

$$-2^k < \delta_i < 2^k \quad (6)$$

其中: k 为信息长度; δ_i 代表载体图像与经 LSB 替代后的隐写图像的嵌入误差。再将 δ_i 进一步分割,得到如下区间:

$$\begin{cases} \text{Interval 1} & 2^{k-1} < \delta_i < 2^k \\ \text{Interval 2} & -2^{k-1} \leq \delta_i \leq 2^{k-1} \\ \text{Interval 2} & -2^k < \delta_i < -2^{k-1} \end{cases} \quad (7)$$

联合模型(7),并修改 P'_i ,形成 P''_i ,设计最优像素调整机制:

$$\text{Case 1 } (2^{k-1} < \delta_i < 2^k): \text{if } P'_i \geq 2^k, \text{ 则 } P''_i = P'_i - 2^k, \text{ 否则 } P''_i = P'_i \quad (8)$$

$$\text{Case 2 } (-2^{k-1} \leq \delta_i \leq 2^{k-1}): P''_i = P'_i \quad (9)$$

$$\text{Case 1 } (-2^k < \delta_i < -2^{k-1}): \text{if } P'_i < 256 - 2^k, \text{ 则 } P''_i = P'_i + 2^k, \text{ 否则 } P''_i = P'_i \quad (10)$$

令 $\delta'_i = P''_i - P_i$,根据式(8)(9),则 δ'_i 计算模型如下:

$$\begin{cases} \text{Case 1 } (2^{k-1} < \delta_i < 2^k \text{ and } P'_i \geq 2^k): \\ \delta'_i = P''_i - P_i = P'_i - 2^k - P_i = \delta_i - 2^k \Rightarrow \\ 2^{k-1} - 2^k < \delta'_i < 2^k - 2^k \Rightarrow -2^{k-1} < \delta'_i < 0 \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \text{Case 2 } (2^{k-1} < \delta_i < 2^k \text{ and } P'_i < 2^k): \\ \delta'_i = P''_i - P_i = P'_i - P_i = \delta_i \Rightarrow 2^{k-1} < \delta'_i < 2^k \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} \text{Case 3 } (-2^{k-1} \leq \delta_i \leq 2^{k-1}): \\ \delta'_i = P''_i - P_i = P'_i - P_i = \delta_i \Rightarrow -2^{k-1} \leq \delta'_i \leq 2^{k-1} \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} \text{Case 4 } (-2^k < \delta_i < -2^{k-1} \text{ and } P'_i < 256 - 2^k): \\ \delta'_i = P''_i - P_i = P'_i + 2^k - P_i = \delta_i + 2^k \Rightarrow \\ -2^k + 2^k \leq \delta'_i \leq 2^{k-1} + 2^k \Rightarrow 0 \leq \delta'_i \leq 2^{k-1} \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} \text{Case 5 } (-2^k < \delta_i < -2^{k-1} \text{ and } P'_i \geq 256 - 2^k): \\ \delta'_i = P''_i - P_i = P'_i - P_i = \delta_i \Rightarrow -2^k < \delta'_i < -2^{k-1} \end{cases} \quad (15)$$

其中: δ'_i 代表载体图像与经最优像素调整处理后的载密图像像素间的嵌入误差。由模型(11)~(15)可知,当 $P'_i < 2^k$ 以及 $P'_i \geq 256 - 2^k$ 时, δ'_i 的绝对值可能是位于 $2^{k-1} < |\delta'_i| < 2^k$;而对于其他三种情况, δ'_i 的绝对值可能是位于 $0 \leq |\delta'_i| < 2^{k-1}$ 。由于 P'_i 是通过直接 LSB 替代信息长度为 K bit 的 P_i 的 K 个不重要位来获取的,所以, $P'_i < 2^k$ 以及 $P'_i \geq 256 - 2^k$ 等价于 $P_i < 2^k$ 以及 $P_i \geq 256 - 2^k$ 。则载体与经最优像素调整后的隐写密文像素间的嵌入误差限制为

$$0 \leq |\delta'_i| \leq 2^{k-1} \quad (16)$$

根据上述模型可知,本文设计的最优像素调整机制只需检测载体图像与经 LSB 替代后的载密图像像素间的嵌入误差,来形成最终的隐写图像。

3 基因算法

为了提高算法效率与容量,找出最佳信息嵌入位置,本文引入基因算法来实现。通过设计新的适应度函数以及映射函数来代替文献[9],而其余步骤相同。根据载体图像与隐写图像之间的绝对误差 $|\delta'_i|$,设计适应度函数 F :

$$F = |\delta'_i| \times \frac{E_{\text{length}}}{A_{\text{length}}} \quad (17)$$

$$|\delta'_i| = \frac{1}{16} \sum_0^3 \sum_0^3 |P'' - P| \quad (18)$$

$$A_{\text{length}} = \frac{P - P'}{P - P''} \quad (19)$$

其中: $|\delta'_i|$ 代表载 δ'_i 的嵌入绝对误差; E_{length} 为嵌入秘密信息长度; A_{length} 代表隐藏信息长度估算值。

利用模型(17), 择取最优映射函数。就本文而言, 将载体图像分割成 4×4 块, 将包含每个分块所有像素的 16 个基因视为映射函数。其余步骤与文献[9]相同, 通过基因算法可获取最优映射函数, 确定最优秘密信息嵌入位置。

4 本文图像隐写算法设计

本文图像隐写算法如图 3 所示。其主要包括两个步骤: a) 秘密信息嵌入算法; b) 提取算法。具体步骤如下:

a) 嵌入算法

(a) 将尺寸为 $M \times N$ 的载体图像分割成 4×4 子块;

(b) 利用本文“1、HDWT 机制”找出每个分块的频域表示, 得到 4 个子带 LL1、LH1、HL1、HH1;

(c) 将基因算法产生的包含每个子块所有像素的基因视为映射函数;

(d) 根据步骤(c)得到的映射函数, 将秘密信息比特嵌入 k -LSBs HDWT 系数中。对于 k 值的择取, 从 $k=3$ 到 $k=6$ 评估图像, 当 $k=1$ 或 2 时, 得到较小的信息隐藏容量, 但隐写图像视觉质量较好; 当 $k=7$ 或 8 时, 得到较大的信息隐藏容量, 但隐写图像视觉不佳。

(e) 迭代模型(17), 择取最优映射函数;

(f) 再利用最优像素调整机制处理步骤(e)得到的图像;

(g) 为了优化隐写图像, 本文以 PSNR 为指标, 构造了图像质量反馈机制:

$$Q = \max(\text{PSNR}) = \max\left(10 \log_{10}\left(\frac{255^2 \times 255^2}{\sum_{i=1}^{256} \sum_{j=1}^{256} (I_{ij} - I'_{ij})^2}\right)\right) \quad (20)$$

其中: Q 代表最大 PSNR 值; I_{ij} 、 I'_{ij} 分别为载体和最终隐写图像的像素; PSNR 为峰值信噪比。

(h) 利用 IHDWT (inverse Hara discrete wavelet transform) 计算这些子块, 获取隐写图像。

b) 提取算法

(a) 将尺寸为 $M \times N$ 的载体图像分割成 4×4 子块;

(b) 对于每个 4×4 分块, 通过本文“1、HDWT 机制”, 提取变换域系数;

(c) 将这些最优映射函数应用于每个嵌入阶段, 找出像素序列, 完成提取;

(d) 在每个像素中, 提取 k -LSB。

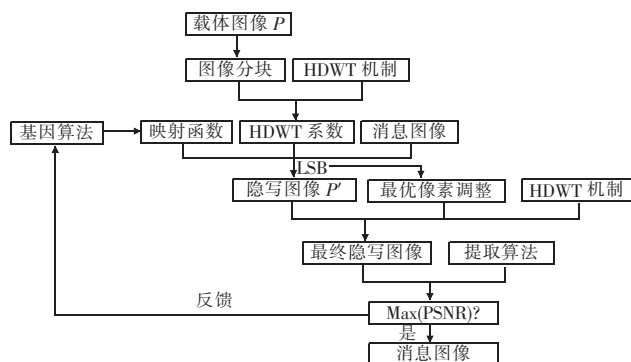


图3 本文图像隐写算法示意图

5 仿真结果及分析

为了体现本文算法的合理性, 设立对照组: 文献[10, 11],

分别记为 A、B 算法。仿真环境为: 采用英特尔 i7, 2.5 GHz 双核 CPU, 200 GB 硬盘, 4 GB 的内存, 操作系统为 Windows 7.0。在 NRCS^[12]、BOWS2 图像库^[13]上测试本文算法及对照组。其中, 将秘密信息嵌入到 k -LSB 中, $k=4$ 。评价指标: (a) 图像差分图; (b) 检测率 ROC 曲线; (c) 隐写容量及复原质量。

5.1 图像差分图

以图 4(a) 为测试对象, 其 1D 概率见图 4(b), 将其在 BOWS2 图像库上实验, 嵌入率为 1 bpp, 结果如图 4 所示。从图中可知, 经本文算法隐写后, 显著降低了其差分图的阶梯效应, 见图 4(c); 而对照组算法的阶梯效应比较严重, 见图 4(d) 和 (e) 箭头所指, 易给攻击者留下破绽, 降低了隐写算法的安全性。

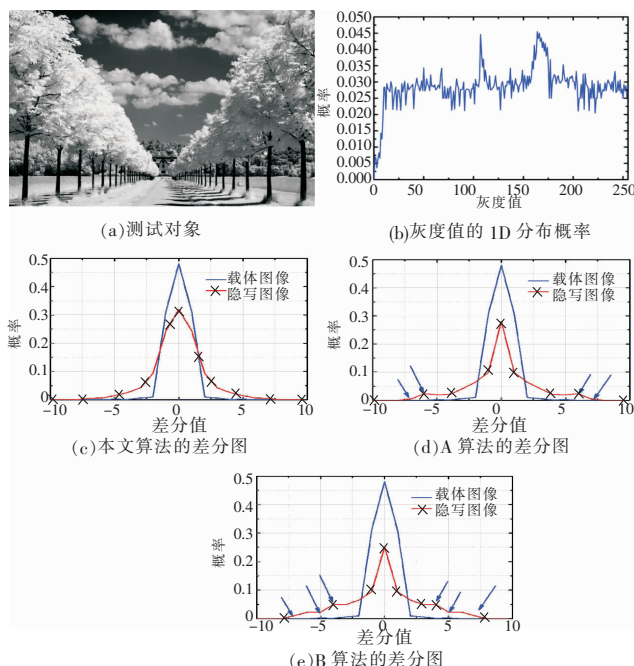


图4 不同隐写算法的图像差分图测试结果

5.2 检测率 ROC 曲线对比分析

在 NRCS 与 BOWS2 库中进行实验, 嵌入率为 0.5 bpp, 结果如图 5 所示。从图中可知, 在两个图像库中, 本文算法的正确检测率要高于 A、B 算法; 特别是在 NRCS 图像库中, 对照组的检测性能最差。这表明本文算法的检测性能要显著优于对照组算法; 为了具体量化这些算法性能, 测试了各个算法的 AUC 值^[14, 15], 结果如表 1 所示。从表中可知, 在 NRCS 库中, 本文算法的 AUC 值达到 0.9784, 而对照算法分别为 0.9471、0.9182。原因是本文算法根据载体图像与隐写图像之间的绝对误差, 设计适应度函数, 借助基因算法, 获取最优映射函数, 定位出秘密信息最优嵌入位置, 提高了算法的不可感知性能; 且设计了最优像素调整机制, 降低载体图像与隐写图像间的嵌入误差, 增加了算法的抗检测性能。

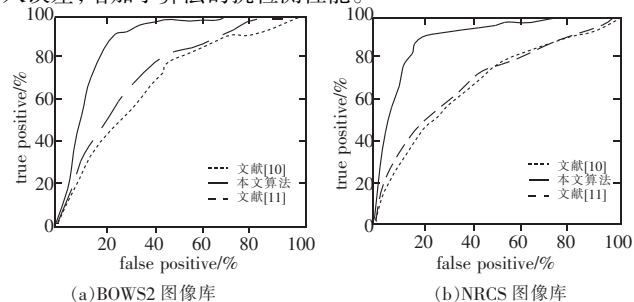


图5 各算法在 NRCS 与 BOWS2 图像库中的 ROC 曲线

表 1 不同算法在 NRCS 与 BOWS2 图像库中的 AUC 值

图像库	隐写算法	0.15	0.25	0.5	0.75
NRCS	A 算法	0.8398	0.8682	0.9182	0.9318
	B 算法	0.8749	0.9171	0.9471	0.9494
	本文算法	0.9155	0.9484	0.9784	0.9987
BOWS2	A 算法	0.8521	0.8804	0.9358	0.9398
	B 算法	0.8905	0.9215	0.9571	0.9608
	本文算法	0.9361	0.9623	0.9906	0.9924

5.3 隐写容量与复原质量对比分析

以图 6(a)、图 7(a) 为测试载体对象, 结果如图 6 和 7 所示。从图 6 中可知, 从视觉上看, 三种不同隐写算法的隐写质量与信息提取质量都比较好, 且本文算法较好地保存着初始载体的直方图特征, 见图 6(x); 而对照组算法因采用 LSB 机制,

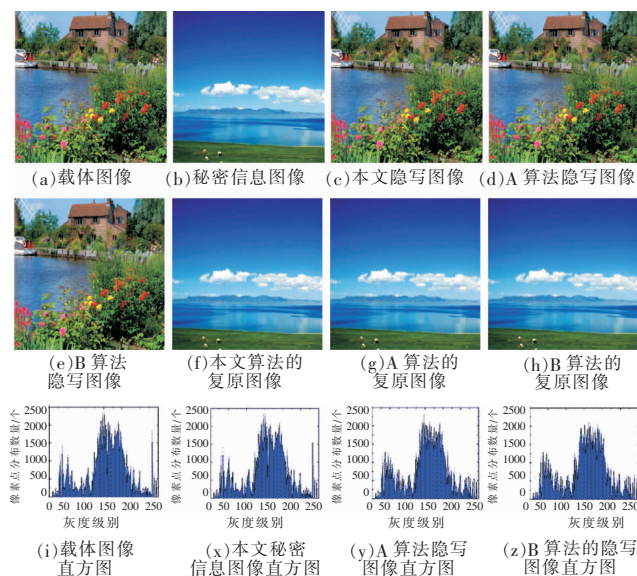


图 6 第一组载体图像经不同隐写算法处理的仿真结果(4-LSB)

表 2 不同算法的 PSNR 与嵌入容量结果

载体图像	本文算法		文献[10]		文献[11]	
	容量/bit	PSNR/dB	容量/bit	PSNR/dB	容量/bit	PSNR/dB
图 5(a)	103126(50%)	39.92	2165(47%)	38.97	984(39%)	38.68
图 6(a)	103126(50%)	40.16	2210(48%)	38.84	1059(42%)	38.07

6 结束语

本文设计了最优像素调整耦合基因算法的高容量图像隐写术以提高信息隐藏容量以及不可感知性能。基于 HDWT 机制, 找出图像分块的频域表示, 以提高隐写鲁棒性; 根据载体图像与隐写图像之间的绝对误差, 设计适应度函数, 借助基因算法, 获取最优映射函数, 将秘密信息嵌入到 HDWT 系数中; 并设计最优像素调整方案, 显著增大隐写容量; 再设计该算法的提取机制, 获取信息图像; 以 PSNR 构建反馈机制, 优化提取质量。仿真结果显示: 与其他隐写机制相比, 本文算法具备更大的隐写容量和更强的不可感知性能。

参考文献:

- [1] Chakraborty S, Jalal A S. Secret image sharing using grayscale payload decomposition and irreversible image steganography [J]. *Journal of Information Security and Application*, 2013, 18(4): 180-192.
- [2] 栗凤永, 张新鹏, 余江. 结合集成比例训练的彩色 JPEG 图像隐写分析[J]. *电子与信息学报*, 2014, 36(1): 153-157.
- [3] Roy R, Sarkar A, Changder S. Chaos based edge adaptive image steganography[J]. *Procedia Technology*, 2013, 10(8): 138-146.
- [4] Rupa C. A digital image steganography using sierpinski gasket fractal and PLSB[J]. *Journal of the Institution of Engineers*, 2013, 94

破坏了原有的部分内容结构, 见图 6(y) 与 (z); 而对于图 7(复杂纹理图像), A、B 算法的隐写性能不佳, 见图 7(d) 和 (e), 有微量信息外漏。为了量化这些算法性能, 测试隐写图像的容量以及 PSNR 值, 结果如表 2 所示。表中可知, 本文算法的隐写容量是最大, 都达到 50%, 且复原质量是最佳的, 其 PSNR 值最大; 而对照组算法的隐写容量普遍较小, 低于 50%。原因是本文算法利用基因算法, 找出了秘密信息的最佳嵌入位置; 且设计了最优像素调整机制, 处理隐写图像, 降低了失真, 最大化复原图像的 PSNR 值; 另外本文以 PSNR 值构造了反馈机制, 不断优化复原质量; 而对照组算法都是利用了 LSB 机制, 引入了部分统计不对称性, 破坏相关内容结构, 降低了隐写图像的安全性。

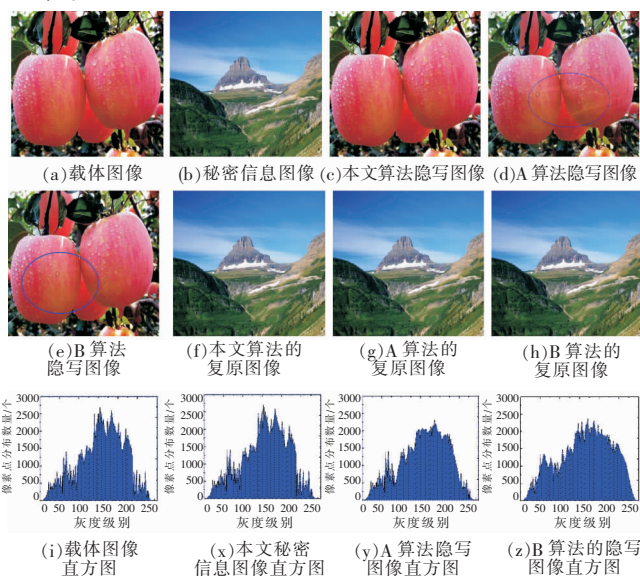


图 7 第二组载体图像经不同隐写算法处理的仿真结果(4-LSB)

(3): 147-151.

- [5] 李明则, 向阳, 张文华. 基于多样性特征的 JPEG 图像隐写分析[J]. *计算机工程*, 2014, 40(1): 153-157.
- [6] 陈嘉勇, 张卫明, 韩涛, 等. 高效 $\pm k$ 自适应图像隐写术[J]. *自动化学报*, 2013, 39(10): 1594-1601.
- [7] 梁婷, 李敏, 何玉杰. 基于人类视觉系统的非抽样 Contourlet 变换域图像隐写算法[J]. *计算机应用*, 2013, 33(1): 153-155.
- [8] Gutub A A. Pixel indicator technique for RGB image steganography [J]. *Journal of Emerging Technologies in Web Intelligence*, 2010, 2(1): 56-64.
- [9] Bandyopadhyay S K, Paul T U, Raychoudhury A. Genetic algorithm based substitution technique of image steganography [J]. *Journal of Global Research in Computer Science*, 2011, 1(5): 69-75.
- [10] Luo Weiqi, Huang Fangjun. Edge adaptive image steganography based on LSB matching revisited[J]. *IEEE Trans on Information Forensics and Security*, 2012, 5(2): 201-214.
- [11] 陈够喜, 张鹏程, 伍玉良. 图像隐写容量归一化研究[J]. *计算机工程与设计*, 2012, 33(6): 121-126.
- [12] Zhu Weina, Drewes J, Gegenfurtner K R. Animal detection in natural images: effects of color and image database [J]. *PLoS One*, 2013, 8(10): 78516-78522.
- [13] Cevahir A, Torii J. High performance online image search with GPUs on large image databases [J]. *International Journal of Multimedia Data Engineering and Management*, 2013, 4(3): 24-41.
- [14] Luo Xiangyang, Liu Fenlin, Yang Chunfang. Steganography of adaptive image steganography in multiple gray code bit-planes [J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2012, 57(3): 651-667.
- [15] Ioannidou A, Halkidis S T, Stephanides G. A novel technique for image steganography based on a high payload method and edge detection [J]. *Expert Systems with Applications*, 2012, 39(14): 11517-11524.