

基于 Slant 变换的半脆弱水印算法

王友卫^{1,2}, 申铨京^{1,2}, 陈海鹏^{1,2}

(1. 吉林大学 计算机科学与技术学院, 长春 130012; 2. 吉林大学 符号计算与知识工程教育部重点实验室, 长春 130012)

摘要: 为了使算法同时具有较高的定位精度和鲁棒性, 提出了一种基于 Slant 变换的半脆弱性数字水印算法. 算法引入“相关块组”的概念, 结合 Slant 变换高能量集中性及直流量化原理完成水印嵌入过程. 在认证过程中使用了定位参考块. 实验结果表明, 该算法能容忍一定程度的 JPEG 压缩、Gauss 噪声等偶然篡改, 对图像中发生的篡改可以有效地检测并进行精确地定位.

关键词: 鲁棒性; 半脆弱水印; 直流量化原理; 参考块

中图分类号: TP 309

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2013)01-0076-05

Semi-fragile Watermarking Algorithm Based on Slant Transform

WANG You-wei^{1,2}, SHEN Xuan-jing^{1,2}, CHEN Hai-peng^{1,2}

(1. College of Computer Science and Technology, Jilin University, Changchun 130012, China;

2. Key Laboratory of Symbolic Computation and Knowledge Engineering of Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130012, China)

Abstract: To keep algorithm's high robustness and accuracy, a semi-fragile digital watermarking algorithm based on slant transform was proposed. The algorithm introduced the conception of "relevant-block-group", finished the process of watermark embedding by utilizing the characteristic of high energy concentration and the principle of the DC coefficient quantization, and used positioning reference blocks during the process of authentication. Experiment results show that, to some extent, the algorithm tolerates the accidental tampering, such as the JPEG compression, gauss noise, etc. The tampered areas can be detected effectively and located accurately.

Key words: robustness; semi-fragile watermark; DC quantization principle; reference block

目前, 已存在许多基于半脆弱水印的图像认证算法^[1-6]. 胡玉平等^[7]使用小波变换后 LL3 层低频逼近系数形成抵抗恶意修改的水印信息和用于确定篡改发生位置的定位水印信息, 提出了一种自适应小波阈值降噪的方法; Zhao 等^[8]结合 Slant 变换将水印序列隐藏至图像像素高位信息中, 并利用原始图像中每个像素点的最低位保存图像内容恢复信息, 同时实现了含水印图像篡改区域的检测及恢复;

王蓓蓓等^[9]使用混沌序列将图像分成 2 部分, 分别用于形成和嵌入水印信息. Slant 变换因其能量集中度高、执行速度快以及在数字图像编码方面的优势已被广泛应用于数字水印算法中^[10-12]. 本文在现有算法的基础上对王蓓蓓等算法做出了改进.

1 基于 Slant 变换的半脆弱水印算法

本文先按照一定的策略将原始宿主图像分成

收稿日期: 2011-09-22.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60773098); 吉林省自然科学基金资助项目(201115025); 吉林大学研究生创新基金资助项目(20111063).

作者简介: 王友卫(1987—), 男, 博士研究生, 主要从事数字水印、图像处理、模式识别方面的研究, E-mail: wyw4966198@126.com.

A、B、C 三部分 算法的流程如图 1 所示。

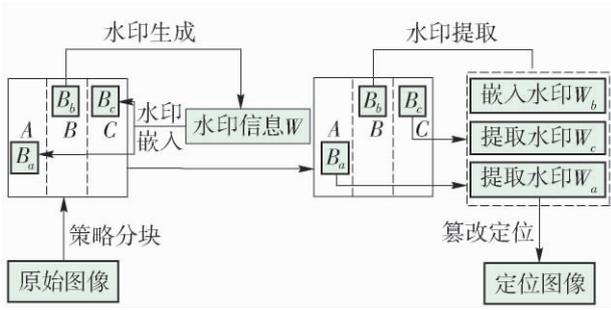


图 1 本文算法流程图

Fig.1 Flow chart of the proposed algorithm

1.1 宿主图像分块

假设宿主图像内某个像素点 α 的行列坐标为 (α_r, α_c) 图像的宽与高分别为 W, H , 定义区域 A、B、C 为: $A = \{\alpha | 0 \leq \alpha_c < W/3\}$; $B = \{\alpha | W/3 \leq \alpha_c < 2W/3\}$; $C = \{\alpha | 2W/3 \leq \alpha_c < W\}$, 如图 2 所示. 针对区域 B 中某个小块 $b, p_b(p_{br}, p_{bc})$ 为 b 中任意点 与 b 对应的另外 2 个像素块 a, c 可按下面方法求得.

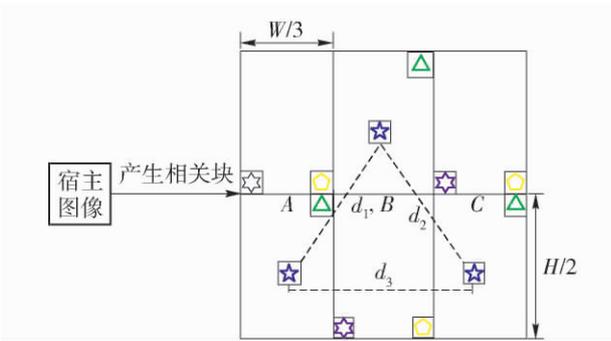


图 2 相关块组产生策略

Fig.2 Policy of producing relevant block groups

1) 当 $p_{br} < H/2$ 时.

$$\begin{cases} a = \{p_a(p_{ar}, p_{ac}) | p_{ar} = p_{br} + H/2, p_{ac} = p_{bc} - W/3\} \\ c = \{p_c(p_{cr}, p_{cc}) | p_{cr} = p_{br} + H/2, p_{cc} = p_{bc} + W/3\} \end{cases}$$

2) 当 $p_{br} \geq H/2$ 时.

$$\begin{cases} a = \{p_a(p_{ar}, p_{ac}) | p_{ar} = p_{br} - H/2, p_{ac} = p_{bc} - W/3\} \\ c = \{p_c(p_{cr}, p_{cc}) | p_{cr} = p_{br} - H/2, p_{cc} = p_{bc} + W/3\} \end{cases}$$

式中 $p_a(p_{ar}, p_{ac})$ 、 $p_c(p_{cr}, p_{cc})$ 分别为宿主图像中像素点. 称 a, b, c 两两相关且共同组成一个相关块组 (如图 2 中标有 \star 的像素块). 设 d_1, d_2, d_3 分别为这 3 个像素块之间任意 2 个分块之间的距离, 定义

$$d = \min(d_1, d_2, d_3) = \min(\sqrt{(W/3)^2 + (H/2)^2}, \sqrt{(W/3)^2 + (H/2)^2} \cdot 2W/3) = \min(\sqrt{13}W/6, 2W/3) = \sqrt{13}W/6 \quad (1)$$

1.2 水印信息生成

该过程分以下步骤执行.

1) 记图像 B 部分中第 i 个的 8×8 大小像素块为 $b_i (0 \leq i < l, l$ 为该部分 8×8 像素块总数) 将 b_i 均分成 4 个小块, 计算每个 4×4 小块的像素块灰度均值并取整. 结果分别表示为 $g_{i1}, g_{i2}, g_{i3}, g_{i4}$, 令

$$g_i = (g_{i1} \oplus g_{i2}) \oplus (g_{i3} \oplus g_{i4}) \quad (2)$$

式中 \oplus 为二进制异或运算, 由于 g_i 取值由 b_i 内各小块灰度内容决定, 故记 g_i 为像素块 b_i 的内容特征值.

2) 取 g_i 高四位比特 $g_i(4) \sim g_i(7)$, 形成二值水印序列 $w_{ij} (j=0, 1, 2, 3)$ 为

$$w_{ij} = g_i(4 + j) \quad (3)$$

1.3 水印信息嵌入

假设区域 B 中用于提取水印的 8×8 大小的图像块编号为 b_i , 提取的水印信息为 $\{w_{ij}\}$ 其中 $j=0, 1, 2, 3$. 采用相似的方法将 $\{w_{ij}\}$ 分别嵌入到与 b_i 相关的 2 个小块 $a_i (a_i \in A)$ 、 $c_i (c_i \in C)$ 中. 下面以嵌入到 a_i 为例介绍水印嵌入具体过程.

1) 将 a_i 分成 4 个 4×4 大小的像素块, 记为 a_{ij} .

2) 对 a_{ij} 进行 4×4 大小的 Slant 变换, 提取其中 DC 系数 d_{ij} .

3) 参照文献 [5] 中直流量化原理, 将 DC 系数集合 $\{d_{ij}\}$ 量化成集合 $\{D_{ij}\}$.

4) 将 $\{w_{ij}\}$ 按下面的方法嵌入到 DC 系数集合 $\{d_{ij}\}$ 中:

① 当 $D_{ij} - d_{ij} \geq 0$ 时.

$$\begin{cases} d'_{ij} = D_{ij} - \theta \times (D_{ij} - d_{ij}), s_{ij} = 0; & \text{如果 } w'_{ij} = 1 \\ d'_{ij} = D_{ij} - \theta \times (D_{ij} - d_{ij}), s_{ij} = 1; & \text{其他} \end{cases}$$

② 当 $D_{ij} - d_{ij} < 0$ 时.

$$\begin{cases} d'_{ij} = D_{ij} + \theta \times (d_{ij} - D_{ij}), s_{ij} = 1; & \text{如果 } w'_{ij} = 1 \\ d'_{ij} = D_{ij} + \theta \times (d_{ij} - D_{ij}), s_{ij} = 0; & \text{其他} \end{cases}$$

式中 θ 为嵌入强度参数. 序列 $\{s_{ij}\}$ 为嵌入密钥, 其值由发送方提供, 用于接收方提取水印信息.

5) 用集合 $\{d'_{ij}\}$ 替换对应 4×4 大小的 Slant 变换系数中的 DC 分量, 然后对每个小块进行逆 Slant 变换, 便得到含有水印信息的像素块 a'_i .

6) 遍历 A 区域中的所有图像块至水印嵌入完成.

1.4 水印信息提取

假设图像 B 部分中用于生成水印信息的像素块为 b'_i , 利用 1.2 节方法生成水印信息 $\{w_{bij}\} (j=0, 1, 2, 3)$, 最后从图像的 A、C 部分中提取水印信息 $\{w_{aij}\}$ 、 $\{w_{cij}\}$.

1) 记 A 部分中与 b_i 相关的图像块为 a'_i , 将 a'_i 分

成4个 4×4 大小的像素块,每块记为 a_{ij}' .

2) 提取 a_{ij}' 经过Slant变换后的DC系数 d_{ij}'' .

3) 根据文献[5]中直流系数量化方法将DC系数集合 $\{d_{ij}''\}$ 量化,生成 $\{D_{ij}'\}$.

4) 按以下方法获得水印信息 $\{w_{aij}\}$:

① 当 $D_{ij}' - d_{ij}'' \geq 0$ 时.

$$\begin{cases} w_{aij} = 1, & \text{如果 } s_{ij} = 0 \\ w_{aij} = 0, & \text{其他} \end{cases}$$

② 当 $D_{ij}' - d_{ij}'' < 0$ 时.

$$\begin{cases} w_{aij} = 0, & \text{如果 } s_{ij} = 0 \\ w_{aij} = 1, & \text{其他} \end{cases}$$

其中 $\{s_{ij}\}$ 为发送方提供的密钥.

5) 至此便得到水印序列 $\{w_{aij}\}$.使用同样的方法,从图像C部分得到水印信息 $\{w_{cij}\}$.

1.5 图像篡改定位

假设从含水印图像B部分的某个分块 b_i 中提取的水印信息序列为 W_b ,从A、C部分中与B相关的像素块 a_i 、 c_i 中提取的水印信息分别为 W_a 、 W_c .故可按以下约定完成图像的篡改定位.

1) $W_a = W_b$ 时: ① $W_a = W_b = W_c$ 时,无篡改; ② 其他情况,像素块 c_i 发生了篡改.

2) 其他情况: ① $W_c = W_a \neq W_b$ 时,像素块 b_i 发生了篡改; ② $W_c = W_b \neq W_a$ 时,像素块 a_i 发生了篡改; ③ 其他情况, a_i 、 b_i 、 c_i 都发生了篡改.

2 实验结果与分析

2.1 水印透明性分析

本实验使用 256×256 大小的Lena、Baboon、Cameraman、Girl四张图片作为宿主图像,含水印图像质量使用峰值信噪比S度量,其值定义如下:

$$S = 10 \times \log(255^2/M) \quad (4)$$

式中 $M = \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} ((f_{xy} - g_{xy})^2/N^2)$, f_{xy} 、 g_{xy} 分别为宿主图像及含水印图像中坐标 (x, y) 像素点灰度值, N 为图像宽(高)度.假设量化步长为 Q ,当前量化后系数为 β ,对于原始系数 $\chi \in [\beta - Q/2, \beta + Q/2)$,当取 $\theta = 0.5$ 时,其修改量 Δ 可按

$$\Delta = \begin{cases} (\beta - \chi)/2, & \chi \in [\beta - Q/2, \beta) \\ (\chi - \beta)/2, & \chi \in [\beta, \beta + Q/2) \end{cases} \quad (5)$$

计算.

对整幅图像而言,有 $|\chi - \beta| \approx Q/4$,故所有系数的平均修改量 Δ 为 $Q/8$.类似地,可以分析得到文献[9]算法的平均修改量为 $Q/2 > \Delta$.当 $Q = 50$ 时,

使用不同算法得到的含水印图像S值对比结果如表1所示.可见,由于使用改进的直流量化原理,本文算法较好地保证了含水印图像的透明性.

表1 不同算法得到的含水印图像S值

Table 1 S values of images using different algorithms

算法	Lena	Baboon	Cameraman	Girl
本文	41.20	43.35	40.58	42.65
文献[9]	36.42	37.36	35.91	36.60

2.2 定位能力分析

图3中(a1)、(a2)、(a3)、(a4)分别对应了对含水印图像进行不同程度的裁剪、替换等操作(篡改区域长、宽最大值均小于 d);(b1)、(b2)、(b3)、(b4)为文献[9]算法对篡改区域的定位效果;(c1)、(c2)、(c3)、(c4)是本文算法得到的定位图.

假设篡改区域大小为 μ (包含 μ 个 8×8 大小的像素块),该区域中正确定位的像素块数为 μ_1 ,其他区域中未发生错误却又被定位出的像素块数为 μ_2 ,定义

$$P_m = 1 - \mu_1/\mu, P_f = \mu_2/\mu \quad (6)$$

分别对Cameraman含水印图像进行不同程度的裁剪、替换操作,使用不同的算法得到 P_m 、 P_f (如图4所示).由图可知,文献[9]算法得到的 P_m 、 P_f 平均值均稳定在0.5左右,而本文所得值均小于0.1,可见后者在定位精度方面做了提升.

2.3 稳健性能分析

假设当前含水印图像总分块数为 η ,当图像遭受偶然攻击时,检测到的块数为 η_1 ,定义偶然攻击下算法误识率 $\kappa = \eta_1/\eta$.当对含水印Cameraman图像做不同质量因子的JPEG压缩测试时,对比本文算法和分别结合Slant、DCT变换的文献[8-9]算法,结果如表2所示.可见,由于使用了快速Slant变换(FST)算法,故相对于文献[9]而言,其他2种算法在执行速度方面优势明显;比较表中 κ 可知,本文利用Slant变换直流系数隐藏水印信息能有效地提高算法针对JPEG压缩攻击的抵抗能力.

为了进一步测试算法的稳健性,这里取20幅大小为 256×256 的灰度图像作为宿主图像,记这些图像所对应的含水印图像S平均值为 \bar{V}_s .实验结果表明,使用文献[7-9]及本文算法所得 \bar{V}_s 分别为43.75、39.42、42.10、42.68.用每种算法对含水印图像分别进行不同程度的Gauss噪声攻击(期望为10),计算所有图像误识率均值 $\bar{\kappa}$,如图5所示.由

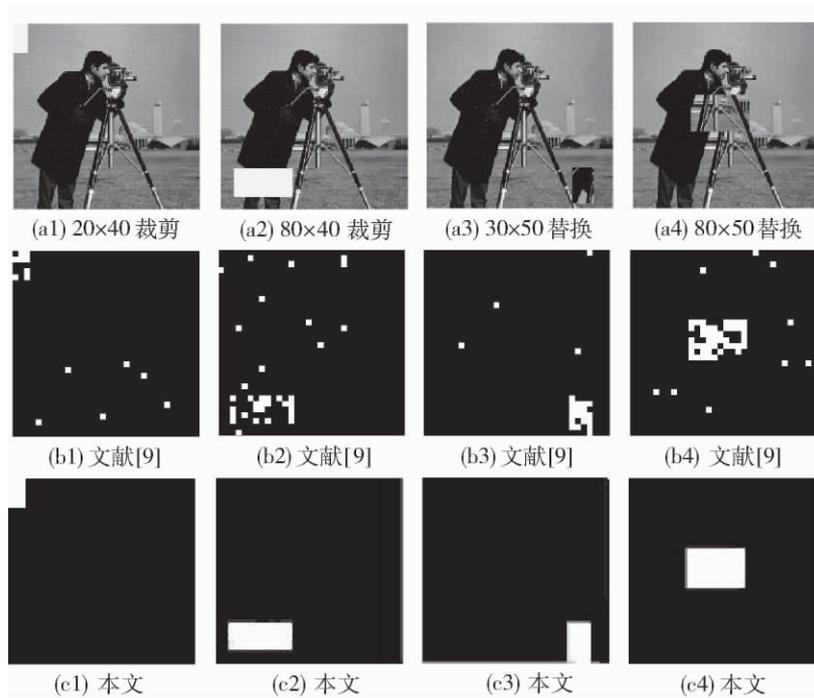


图 3 图像篡改区域定位效果比较

Fig. 3 Compares of positioning results

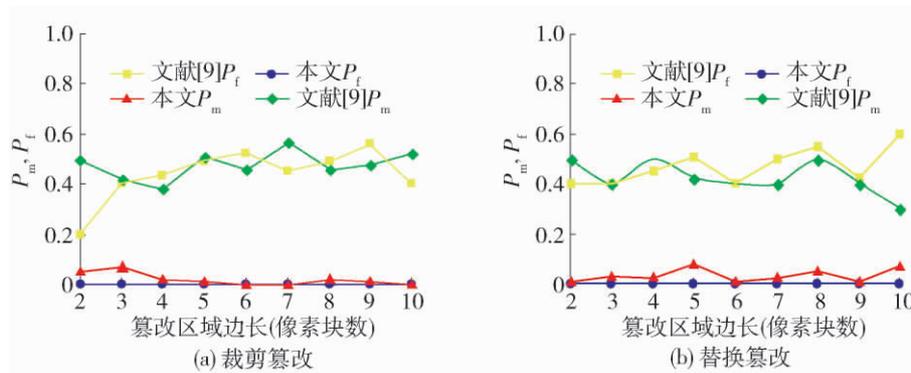


图 4 使用不同算法得到的 P_m 、 P_f 比较

Fig. 4 Compare of P_m 、 P_f using different algorithms

表 2 不同质量因子的 JPEG 压缩攻击下 κ 、 t 值比较
Table 2 Comparisons of κ , t values under different JPEG compress attacks with different quality factors

JPEG 质量压缩因子	本文		文献[8]		文献[9]	
	κ	t/ms	κ	t/ms	κ	t/ms
90	0.000	35.115	0.000	30.153	0.000	52.156
80	0.000	37.132	0.101	33.256	0.093	53.142
70	0.127	34.120	0.254	35.127	0.169	55.243
60	0.252	35.114	0.386	32.212	0.267	50.175
50	0.403	35.623	0.456	33.937	0.490	49.452

注: t 为执行时间.

图 5 可知, 在相同程度的噪声攻击下, 本文算法保持了较高的水印透明度, 有效地降低了其针对偶然篡改

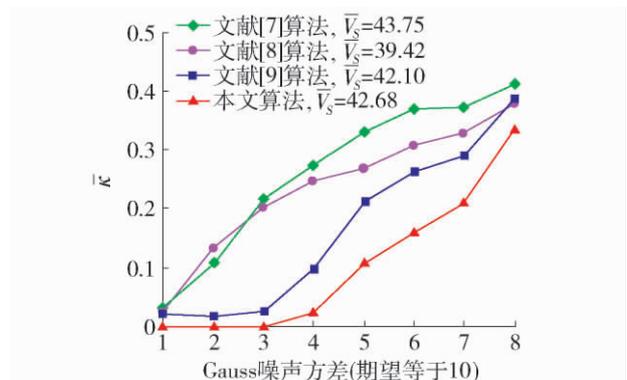


图 5 使用不同算法得到的 $\bar{\kappa}$ 值比较

Fig. 5 Compare of $\bar{\kappa}$ values using different algorithms

改的误识率均值 $\bar{\kappa}$. 表3比较了其他偶然攻击类型下不同算法产生的 $\bar{\kappa}$ 值. 相对于其他算法而言, 表内所列举的攻击类型更容易被本文算法接受.

表3 不同程度噪声攻击下得到的 $\bar{\kappa}$

Table 3 $\bar{\kappa}$ values under noise tempers at different levels

篡改类型	0.2%	0.5%	中值滤波	中值滤波
	椒盐噪声	椒盐噪声	3×3	5×5
本文	0.021	0.043	0.035	0.079
文献[7]	0.063	0.078	0.085	0.101
文献[8]	0.037	0.059	0.043	0.081
文献[9]	0.023	0.046	0.039	0.075

3 结论

本文结合 Slant 变换能量集中性高以及执行速度快的特点, 提出了一种高鲁棒性的半脆弱性数字水印算法; 并提出“相关块组”的概念, 根据直流量化原理将水印信息隐藏到相关像素块直流系数中, 篡改定位过程引入了定位参考块, 提高了对于篡改的定位精度. 实验结果证明, 该算法具有一定抵抗偶然攻击的能力, 符合半脆弱性水印的一般要求.

参考文献:

- [1] SONG H H, QIU Z H, GU J. A novel semi-fragile image watermarking scheme based on wavelet [C] // Audio Language and Image Processing (ICALIP). Piscataway: IEEE, 2010: 1504-1510.
- [2] ABDEL A B, CHOU J Y. Performance analysis of a content authentication semi-fragile watermark [J]. Electrical and Computer Engineering, 2003, 3(9): 2055-2058.
- [3] FEI C H, KWONG R H. A hypothesis testing approach to semi-fragile watermark-based authentication [C] // IEEE Signal Processing Society. Piscataway: Petropulu, 2009: 179-192.
- [4] CONG J, YAN C, XIAO L Z. Semi-fragile watermark based on adaptive quantization for image content authentication [C] // International Conference on E-Business and Information System Security. Wuhan [s. n.], 2009: 1-5.
- [5] 李晓伟, 李伟, 薛向阳. 一种格矢量量化半易损水印算法[J]. 小型微型计算机系统, 2009, 30(2): 327-331. LI Xiao-wei, LI Wei, XUE Xiang-yang. Semi-fragile watermarking scheme using lattice vector quantization [J]. Journal of Chinese Computer System, 2009, 30(2): 327-331. (in Chinese)
- [6] 车生兵, 黄达, 李光. 基于视觉特性的半脆弱水印算法[J]. 通信学报, 2007, 28(10): 134-139. CHE Sheng-bing, HUANG Da, LI Guang. Semi-fragile image watermarking algorithm based on visual features [J]. Journal on Communications, 2007, 28(10): 134-139. (in Chinese)
- [7] 胡玉平, 陈志刚. 用于图像认证的小波域半易损水印算法[J]. 电子学报, 2006, 34(4): 653-657. HU Yu-ping, CHEN Zhi-gang. Wavelet domain semi-fragile watermarking algorithm for image authentication [J]. Chinese Journal of Electronics, 2006, 34(4): 653-657. (in Chinese)
- [8] ZHAO X, HO A T S, TREHARNE H, et al. A novel semi-fragile image watermarking, authentication and self-restoration technique using the slant transform [C] // Third International Conference on Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing. Kaohsiung: IEEE, 2007: 283-286.
- [9] 王蓓蓓, 王希常, 刘江. 一种面向图像内容认证的半脆弱数字水印算法[J]. 计算机应用研究, 2010, 27(1): 234-236. WANG Bei-bei, WANG Xi-chang, LIU Jiang. New semi-fragile watermarking algorithm based on image content authentication [J]. Application Research of Computers, 2010, 27(1): 234-236. (in Chinese)
- [10] HOU Z X, XU N N, CHEN H, et al. Fast slant transform with sequency increment and its application in image compression [C] // International Conference on Signal Processing. Beijing: IEEE, 2004: 65-68.
- [11] 段贵多, 赵希, 李建平, 等. 一种新颖的用于图像内容认证、定位和恢复的半脆弱数字水印算法研究[J]. 电子学报, 2010, 38(4): 842-847. DUAN Gui-duo, ZHAO Xi, LI Jian-ping, et al. A novel semi-fragile digital watermarking algorithm for image content authentication, localization and recover [J]. Chinese Journal of Electronics, 2010, 38(4): 842-847. (in Chinese)
- [12] HO T S, ZHU X Z. A slant transform watermarking for copyright protection of satellite images [C] // Proceedings of the 2003 Joint Conference of the Fourth International Conference on Information, Communications and Signal Processing. Singapore: IEEE, 2003: 1178-1181.

(责任编辑 梁洁)