

文章编号: 1673-5196(2011)06-0083-05

# 超复数变换域的视感知内容数字水印算法

李 策<sup>1,2</sup>, 李宝森<sup>1,2</sup>, 肖利梅<sup>1,2</sup>, 虎亚玲<sup>1,2</sup>

(1. 兰州理工大学 电气工程与信息工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 甘肃省工业过程先进控制重点实验室, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:** 针对彩色图像内容保护问题, 提出一种具有视觉感知属性的超复数频域图像水印嵌入算法. 该算法首先用傅氏谱残差方法, 在 HSI 颜色空间提取多分辨率彩色载体图像的归一化显著性区域, 再对版权水印混沌置乱加密后, 将其嵌入至显著性区域所在的超复数颜色矢量中频段系数中, 最终实现对彩色图像显著性内容的盲水印保护. 实验表明, 该方法能够有效抵抗多种常见攻击以及剪切、背景置换等特殊攻击, 具有较高的安全性、鲁棒性和不可见性.

**关键词:** 超复数傅立叶变换; 谱残差; 显著性检测; 盲水印

**中图分类号:** TN391.4 **文献标识码:** A

## Watermarking algorithm with visual perception object in hypercomplex Fourier transform domain

LI Ce<sup>1,2</sup>, LI Bao-sen<sup>1,2</sup>, XIAO Li-mei<sup>1,2</sup>, HU Ya-ling<sup>1,2</sup>

(1. College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China; 2. Key Laboratory of Gansu Advanced Control for Industrial Processes, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** An image watermarking insertion algorithm for hypercomplex frequency domain with visual perception object was proposed for protection of colored image content. In the algorithm presented, first the Fourier spectral residual method was used to extract the salient object region of multi-resolution color image in HSI color space. Then, after the copyright watermarking was chaotically scrambled and ciphered, it was embedded into the mid-frequency coefficient of hypercomplex color vector on the salient region. Finally, the protection of blind watermarking of color image salient object was realized. The experimental result showed that the proposed method could be used for effective resistant several common attack and some special attack such as cropping and background replacing, manifesting a higher security, robustness, and invisibility.

**Key words:** hypercomplex Fourier transform; spectral residual; saliency detection; blind watermarking

多媒体数字化技术与网络技术的迅速发展, 使得海量数字媒体作品的交流与传播极为广泛. 数字作品内容的盗版和侵权问题日益突出, 寻求有效的保护数字产品知识产权的需求已被提到了前所未有的高度. 数字水印技术作为一种潜在的解决方案受到了广泛关注, 并已成为国内外相关学术研究的热点问题之一<sup>[1]</sup>.

近年来, 相关研究人员已提出了诸数字水印算法, 但数字水印的嵌入多是针对灰度图像进行的.

即使载体图像是彩色的, 大部分算法也仅是通过提取它的亮度信息或使用单色通道信息而实现. 文献[1]指出, 这类算法或根据人类视觉弱敏感的蓝色通道, 或根据 RGB 颜色互相关等特性进行处理后实施水印嵌入, 均未能充分利用彩色图像的全彩色空间信息. 文献[2,3]基于四元数超复数空间直接对彩色图像的 RGB 三色分量进行整体矢量建模, 并进行超复数傅立叶变换, 采用“交叉冗余”等规则实现了有意义水印的嵌入. 由于该类算法将拟嵌入水印扩散到了彩色图像的三个分量中, 故具有很强的隐蔽性、鲁棒性和安全性. 文献[4,5]则考虑到人类视觉的选择性注意机制, 将水印加载于图像中最感兴趣的视

收稿日期: 2011-03-24

基金项目: 甘肃省自然科学基金(1014ZSB064)

作者简介: 李 策(1974-), 男, 辽宁营口人, 副教授.

感知区域, 以实现对其内容的优先保护. 但其提取视感知区域要么直接简单指定<sup>[4]</sup>, 要么基于亮度、对比度、位置、纹理、边缘等多种图像特征进行复杂的综合计算后提取视感知区域<sup>[5]</sup>, 而且所用水印嵌入方法均未能整体考虑彩色图像的全彩色空间信息.

在平面设计、广告、新闻媒体和网络数字媒体业务等诸多应用领域中, 存在大量具有感兴趣目标的图像或图像序列. 这些图像的感兴趣目标经常面临被剪切或背景置换等特殊的攻击, 但常见水印算法均难以提取此类攻击后的版权信息. 然而, 用户在要求水印具有很强隐蔽性的同时, 更希望对那些感兴趣目标区域进行版权保护. 故此, 本文在前人工作的基础上, 提出一种彩色图像超复数频域视感知区域的数字水印算法.

### 1 本文所提算法

本文提出一种新的彩色图像水印算法, 该算法基于图像底层特征计算出显著性视感知区域并将其作为感兴趣目标区域, 且在彩色图像超复数傅立叶变换作用下, 对此区域嵌入经过置乱加密后的鲁棒水印. 算法框图如图 1 所示, 具体步骤如下:

步骤 1 显著性视感知区域提取: 1) 将原始图像 RGB 颜色空间变换至人类视觉更为敏感的 HSI (Hue, Saturation, Intensity) 色彩空间, 并进行多分辨率高斯金字塔下采样滤波; 2) 对 H、S、I 各分辨率下的特征图分别利用傅立叶谱残差计算相应的显著图; 3) 将各分辨率下的显著性图线性插值归一化处理, 得到最终显著性图; 4) 取显著性图中最大显著性

系数所在区域作为水印载体. 同时为了配合后述水印嵌入算法的分块模式, 将此区域标记为矩形区域 (如图 1 所示显著性图中的矩形框).

步骤 2 版权水印的混沌加密置乱: 为使所嵌入的版权水印更具隐蔽性, 将水印图像经 Arnold 算法混沌置乱, 加密处理.

步骤 3 彩色图像的超复数傅立叶变换: 对原始图像进行彩色图像的超复数快速傅立叶变换.

步骤 4 版权水印的嵌入: 在步骤 1 所给出的载体区域中, 对相应区域的三颜色整体矢量傅立叶系数中频段嵌入版权水印. 经过超复数傅立叶反变换重构后的图像, 即为已对视觉显著性最大区域嵌入水印后的图像, 如图 1 所示.

### 2 关键技术实现

#### 2.1 彩色图像的超复数傅立叶变换

根据文献[2], 彩色图像可利用四元数将其三色空间视为一个超复数整体矢量进行描述, 这样既体现了不同色彩分量在色彩空间的特定联系, 又能反映出彩色图像的特殊属性. 下式即为彩色图像 RGB 的纯超复数 (仅有纯虚部) 表示:

$$f(m, n) = \text{Red}(m, n)i + \text{Green}(m, n)j + \text{Blue}(m, n)k \tag{1}$$

式中:  $(m, n)$  为彩色图像中像素的坐标; 其虚数单位  $i, j, k$  之间的关系为

$$i^2 = j^2 = k^2 = ijk = -1 \tag{2}$$

进而, 将式(1)的 3 个虚数在单位矢量  $\mu = (i + j + k) / \sqrt{3}$  上投影分解后, 可利用快速傅立叶变换 FFT 算法, 快速实现彩色图像超复数  $f(m, n)$  的傅氏正反变换<sup>[2-3]</sup>, 如下面两式所示:

$$F(u, v) = (\text{Re}(\text{Red}_{\text{FFT}}) + \mu \text{Im}(\text{Red}_{\text{FFT}}))i + (\text{Re}(\text{Green}_{\text{FFT}}) + \mu \text{Im}(\text{Green}_{\text{FFT}}))j + (\text{Re}(\text{Blue}_{\text{FFT}}) + \mu \text{Im}(\text{Blue}_{\text{FFT}}))k \tag{3}$$

$$f(m, n) = (\text{Re}(A_0_{\text{iFFT}}) + \mu \text{Im}(A_0_{\text{iFFT}})) + (\text{Re}(A_1_{\text{iFFT}}) + \mu \text{Im}(A_1_{\text{iFFT}}))i + (\text{Re}(A_2_{\text{iFFT}}) + \mu \text{Im}(A_2_{\text{iFFT}}))j + (\text{Re}(A_3_{\text{iFFT}}) + \mu \text{Im}(A_3_{\text{iFFT}}))k \tag{4}$$

式中:  $\text{Re}(\cdot)$  为复数的实部;  $\text{Im}(\cdot)$  为复数的虚部; FFT 则表示实数快速傅立叶变换; iFFT 与式(3)中的 FFT 对应, 表示实数快速傅立叶反变换.

设经变换后, 式(3)在超复数频域的实部为  $A_0(u, v)$ , 3 个虚部为  $A_1(u, v)$ 、 $A_2(u, v)$  和  $A_3(u, v)$ , 则其超复数傅立叶反变换可由式(4)表示.

#### 2.2 视觉显著性区域选择

视觉心理学研究指出人类视觉感知具有选择

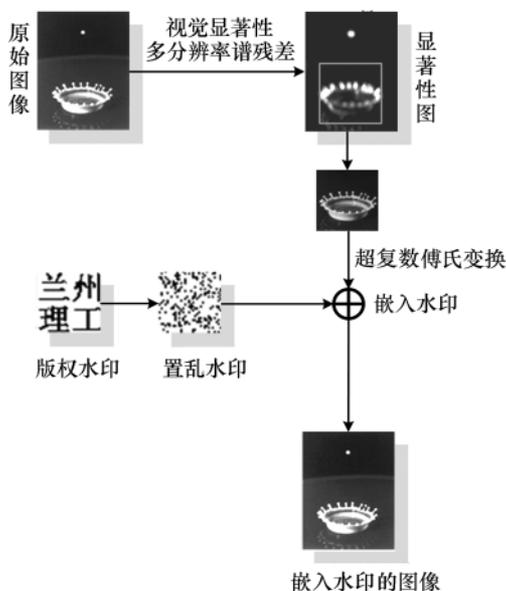


图 1 本文所提数字水印算法框图

Fig. 1 Overview of the proposed watermarking algorithm

性. 有实验证明, 人眼在浏览一幅图像时, 首先关注的是其中最为显著的区域. 这种视感知显著性区域也常常是应该受数字版权保护的区域. 文献[6]利用中央-周围算子, 比较目标区域与其周围区域在颜色、亮度以及方向等多尺度特征的差异, 从而形成显著性灰度图, 图中越亮的区域表示其显著性越大, 但此算法计算较为复杂. 文献[7]提出一种基于光谱残差和傅氏变换的显著性区域快速提取算法(以下简称 SR 算法), 该算法具有较高的检测率和时效性.

由于 SR 算法是一种单尺度及仅用亮度特征的视觉显著性算法, 其结果还有不尽人意之处. 本文在保证整体算法快速性的同时, 基于 SR 算法在 HSI 视感知颜色空间进行多尺度运算, 再利用线性插值将各尺度下的 SR 特征显著性图归一化得到综合关注图 SM:

$$SM = \sum_{l=1}^n (SR(H^l), SR(S^l), SR(I^l)) \quad (5)$$

式中:  $N(\cdot)$  为线性插值归一化算子;  $l=1, 2, \dots, n$  为高斯金字塔下采样尺度因子, 本文中取  $l=3$ . 这里为简化叙述, 将 SR 算法记为  $SR(\cdot)$  算子.

同时, 考虑到人眼视觉注意力趋于图像中央的有偏采样特性, 本文将 SM 中每点像素显著性与其距图像中心距离加权后, 最终提取出较为适合进行数字水印嵌入的视感知显著性区域  $SM_{\text{final}}$ :

$$SM_{\text{final}}(x, y) = (1 - D_c(x, y))SM(x, y) \quad (6)$$

$$D_c(x, y) = \frac{\sqrt{(x - M/2)^2 + (y - N/2)^2}}{4\sqrt{M^2 + N^2}} \quad (7)$$

式中:  $M \times N$  为图像的尺寸,  $D_c(x, y)$  为点  $(x, y)$  距离图像中心的距离.

图 2 给出上述过程对建筑物、人物以及动物图像的显著性区域提取结果. 图中左侧为输入图像, 中间为所得显著性灰度图, 右侧为显著性在原图中的增强显示效果, 其中暖色调区域即为待嵌入水印的区域. 为了配合快速超复数傅氏计算, 本文在计算中需对该区域做最大矩形标记处理.

### 2.3 水印图像的置乱加密

对水印图像混沌置乱加密, 可消除二值水印图像的像素空间相关性, 提高数字水印算法的鲁棒性, 进一步隐藏其图像本身的版权信息. 置乱后的水印图像, 像素的总个数不变, 直方图不变. 由于混沌序列的随机性, 使其常被用作数字图像置乱加密算法, 主要算法有 Arnold 变换、Logistic 映射和 Cat 映射等. Arnold 算法简单且具有周期性, 考虑到实时性, 本文选用 Arnold 变换对水印图像进行置乱<sup>[8]</sup>. Arnold 变换的定义为

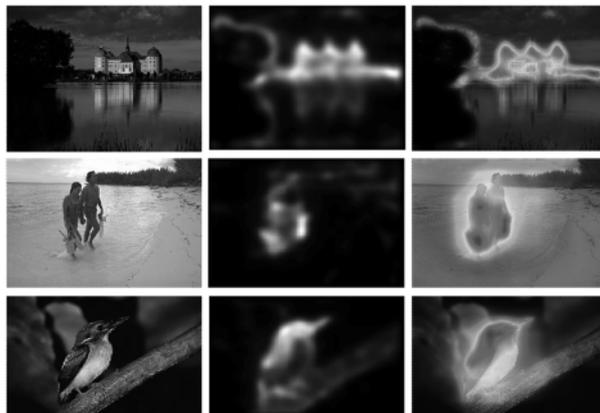


图 2 显著性区域提取

Fig. 2 Extraction of salient region

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \bmod N \quad (8)$$

式中:  $x, x', y, y' \in \{0, 1, \dots, N-1\}$ ,  $N$  为水印图像的宽和高. 由式(8)可将水印图像每个像素点的取值对应到一个矩阵上, 经过 Arnold 变换后的矩阵可实现对水印图像的置乱. 如此继续变换经过一定周期(本文为 16)后即可恢复原有水印图像, 这就是 Arnold 变换的周期性. 由于水印图像尺寸较小( $32 \times 32$ ), 因此对其置乱并不耗时.

### 2.4 盲水印的嵌入与提取

由于 JPEG 等常见的图像压缩算法均采用的是分块处理, 且以  $8 \times 8$  为基本划分单位, 因此, 为增加水印的抗攻击能力, 取视感知显著性区域矩形区域为  $8 \times 8$  块的整数倍. 随后可对每小块进行超复数傅氏变换, 并在其中频系数中嵌入水印.

根据文献[2], 由彩色图像超复数傅立叶变换和反变换式(3, 4), 可以发现超复数频域中的实部  $A_0(u, v)$  经过反变换后, 其空域超复数仍然为纯虚数表示. 也就是说, 在  $A_0(u, v)$  中频系数所嵌入的水印, 经过变换恢复到空域后, 其水印误差将被分散到图像的 3 个空间颜色分量中, 且仍为纯虚数表示的超复数. 因而, 实现了水印的不易感知和有效抗攻击的有意义整合.

水印的盲检测是一种在检测和提取水印信息的过程中, 无需原始图像配合来检测和提取水印信息的方法. 本文采用经典的量化索引调制(QIM)方法<sup>[3]</sup>. 盲水印嵌入和提取的具体过程如下:

1) 将待嵌入水印的视感知显著性区域分成  $8 \times 8$  的子块, 记为  $SD_{m,n}$ , 其中  $m, n$  表示该子块在待嵌入水印区域中的位置. 对  $SD_{m,n}$  进行超复数傅立叶变换, 得到其频域实部系数  $A_0(u, v)_k$ . 参考经典 JPEG 图像编码标准中,  $8 \times 8$  DCT 块量化所用的 Zig-Zag

索引编号,可取  $k = \{7, 8, 11, 12, 13, 16, 17, 18, 19, 22, 23, 24, 25, 26\}$ ,共 14 个中频系数.由此亦可知  $32 \times 32$  的水印数据则需 65 个  $8 \times 8$  子块的待嵌入空间.故本文算法的显著性区域载体不宜过小.

2) 设由 2.3 节得到的待嵌加密水印序列为  $w$ ,对视感知显著性区域中每个子块  $SD_{m,n}$  对应步骤 1) 选定的  $A_0(u, v)_k$  中的中频系数依序进行水印的嵌入:

$$\begin{aligned} & \text{if } w = 1 \\ & \text{if } \text{mod}\left(\left\lfloor \frac{A_0(u, v)_k}{\Delta} \right\rfloor, 2\right) = 0 \\ & \hat{A}_0(u, v)_k = \begin{cases} A_0(u, v)_k + \Delta & \text{if } (A_0(u, v)_k \geq 0) \\ A_0(u, v)_k - \Delta & \text{if } (A_0(u, v)_k < 0) \end{cases} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} & \text{if } w = 0 \\ & \text{if } \text{mod}\left(\left\lfloor \frac{A_0(u, v)_k}{\Delta} \right\rfloor, 2\right) = 1 \\ & \hat{A}_0(u, v)_k = \begin{cases} A_0(u, v)_k + \Delta & \text{if } (A_0(u, v)_k \geq 0) \\ A_0(u, v)_k - \Delta & \text{if } (A_0(u, v)_k < 0) \end{cases} \end{aligned} \quad (10)$$

式中:  $\Delta$  是量化步长,该值决定了嵌入水印的鲁棒程度,本文中  $\Delta$  取值为 0.2.

3) 对于嵌入水印图像,提取其视感知显著性区域后,对该区域对应超复数傅氏变换后的实部中频系数进行水印提取水印序列  $w'$ :

$$w' = \begin{cases} 0, & \text{if } \text{mod}\left(\left\lfloor \frac{\hat{A}_0(u, v)_k}{\Delta} \right\rfloor, 2\right) = 0 \\ 1, & \text{if } \text{mod}\left(\left\lfloor \frac{\hat{A}_0(u, v)_k}{\Delta} \right\rfloor, 2\right) = 1 \end{cases}$$

然后,根据 Arnold 变换将得到的水印序列  $w'$  反置乱,得到最终的数字水印验证信息.

### 3 实验结果与分析

对本文算法在 Matlab7.0 环境下进行仿真和验证.本文取常用水印载体图像、Kodak 标准图像以及文献[7]提供的自然环境图像测试集的部分图像作为水印载体;取  $32 \times 32$ “兰州理工”二值图像作为水

印图像,并对所提算法进行测试,实验结果表明本文算法有效.程序运行环境为 Intel 2.4 GHz CPU,1G 缓存.处理一幅  $512 \times 512$  的图像,一般需要 2 s 左右.

#### 3.1 盲水印嵌入与提取结果

为了定量分析水印加入原始载体图像的不可见性,采用峰值信噪比 PSNR(peak signal to noise ratio)的值来衡量.表 1 给出了 Milkdrop( $500 \times 657$ ) (见图 1)、Seaside( $768 \times 512$ ) (见图 2)和 Castle( $800 \times 600$ ) (见图 2)3 幅图像嵌入后三颜色通道 PSNR 值以及提出水印与原始水印的归一化相关系数 NC 值.由表 1 数据可知,本文所提算法对图像视觉三个颜色通道以及整体质量影响均很小,说明所加版权水印具有较好的隐蔽性.

表 1 嵌入水印后的 PSNR 值和水印相似度

Tab. 1 PSNR and NC of watermarked image

参数	Milkdrop. png	Seaside. png	Castle. png
PSNR-Red	42.743 2	45.718 3	45.851 8
PSNR-Green	42.668 3	45.632 1	45.846 1
PSNR-Blue	42.694 2	45.702 9	45.834 2
NC	0.999 8	0.9995	0.999 7

#### 3.2 抗攻击检测

以 Kodak 公司标准图集中的 Seaside. png 等图像为例,表 2 给出了嵌入水印图像、受到中值滤波、椒盐噪声、高斯平滑( $\sigma^2 = 2\%$ )、 $Q = 50$  JPEG 压缩等常见攻击(所用攻击软件为 Stirmark 4.0)以及剪切、背景置换特殊攻击后,从视感知区域提取版权水印的结果及 NC 值(表 2 中图示水印为清晰,有所放大).由表 2 所示结果可知,当经受噪声和中值滤波攻击时,本算法较鲁棒,仍能较清晰地看出水印.而受高斯平滑和 JPEG 压缩攻击后的效果则略差,但依然可以根据所提水印明确地判断出版权信息.另如图 3 所示,左侧第一列为原始图像,图像中的矩形为待嵌入水印的视感知区域,第二列为水印嵌入后图像及 PSNR 值,从主客观值均反映出所提算法水印隐蔽性较好;后两列为受到剪切以及背景置换等特殊攻击后的效果,结合表 2 后两列数据可知,本文

表 2 攻击前后所提水印的主客观结果

Tab. 2 Subjective and objective results of watermarking before and after attacks

图像	未受攻击	中值滤波	椒盐噪声	高斯平滑	JPEG 压缩	剪切	背景置换
	兰州理工	兰州理工	兰州理工	兰州理工	兰州理工	兰州理工	兰州理工
PSNR/NC	46.802 8/0.999 8	37.663 1/0.993 2	24.351 7/0.965 7	26.567 1/0.952 3	31.986 2/0.947 9	5.427 9/0.997 7	17.114 2/0.999 3
	兰州理工	兰州理工	兰州理工	兰州理工	兰州理工	兰州理工	兰州理工
PSNR/NC	45.684 4/0.999 5	36.789 2/0.992 1	24.219 8/0.965 5	25.019 5/0.940 2	31.077 5/0.942 5	6.869 1/0.996 8	17.440 5/0.999 1

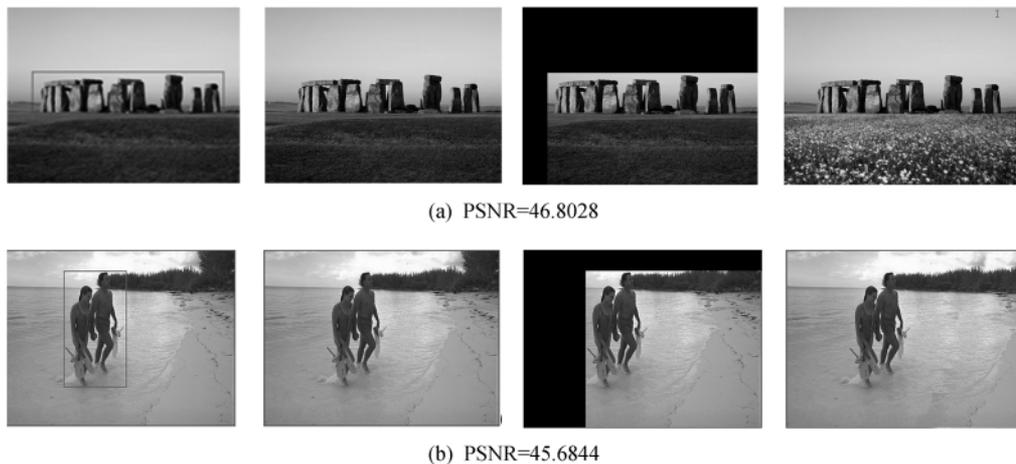


图 3 原始图像、嵌入水印图像(含 PSNR)、被剪切以及背景置换等攻击后的图像(从左至右)

Fig. 3 Original image, embedded watermarking image (PSNR included), cropping image and background replacing (from left to right)

算法对特殊攻击后的视感知区域仍可提取出鲁棒的版权保护信息.

## 4 结论

基于超复数矢量空间和人类视觉注意力机制与数字内容版权保护的联系,本文提出一种融合视觉显著性和超复数傅立叶变换的彩色图像盲水印算法:利用多分辨率谱残差视觉注意力算法,提取图像中显著性区域作为水印载体,实施彩色图像超复数傅立叶变换,而在其中频段嵌入经置乱加密后的混沌水印信息,最终实现对图像内容的数字版权保护.实验结果表明,嵌入水印后对图像可视性的影响较小,并对多种攻击具有一定的鲁棒性.

由于攻击图像手段多样化以及图像存在多个潜在显著性目标的可能,后续将致力于进一步提高算法抗攻击能力和多视感知目标盲水印算法研究.

### 参考文献:

[1] TRÉMEAU A, MUSELET D. Recent trends in color image watermarking [J]. Journal of Imaging Science and Technology, 2009, 53(1): 1-15.

[2] BAS P, LE BIHAN N, CHASSERY J M. Color image watermarking using quaternion fourier transform [C]//IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Hong Kong: IEEE, 2003: 521-524.

[3] 江淑红, 张建秋, 胡波. 彩色图像超复数空间的自适应水印算法 [J]. 电子学报, 2009, 37(8): 1773-1778.

[4] 赵红, 王向阳, 杨红颖. 基于感兴趣区域的图像水印嵌入算法研究 [J]. 小型微型计算机系统, 2007, 28(5): 920-925.

[5] MOHANTY S P, BHARGAVA B K. Invisible watermarking based on creation and robust insertion extraction of image adaptive watermarks [J]. ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications, and Applications, 2008, 5(2): 1-24.

[6] ITTI L, KOCH C, NIEBUR E. A model of saliency-based visual attention for rapid scene analysis [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998, 20(11): 1254-1259.

[7] HOU Xiaodi, ZHANG Liqing. Saliency detection: spectral residual approach [C]//Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Minnesota: IEEE, 2007: 1-8.

[8] 孔涛, 张亘. Arnold 反变换的一种新算法 [J]. 软件学报, 2004, 15(10): 1558-1564.