

包装印刷

抗打印扫描彩色图像水印算法

谢勇, 谭海湖, 王凯丽, 刘林
(湖南工业大学, 株洲 412007)

摘要: **目的** 设计一种适用于彩色打印扫描图像的鲁棒性盲水印算法。**方法** 结合四元数傅里叶变换及离散小波变换的优点, 提出了一种双变换域全息水印算法。利用四元数傅里叶变换及离散小波变换, 将全息水印信息分散嵌入到彩色宿主图像 3 个色彩分量的低频小波系数区域, 而不引起大的图像失真, 同时, 算法实现了盲提取。**结果** 算法满足不可见性要求, 同时打印扫描实验证明, 该算法具有抵抗打印扫描攻击的能力。**结论** 结合四元数傅里叶变换及离散小波变换的双变换域水印算法, 保留了 2 种变换域在处理彩色图像中的优点, 在应用于打印扫描彩色图像时, 效果比现有算法更好。

关键词: 四元数傅里叶变换; 离散小波变换; 双变换域; 打印扫描

中图分类号: TS853⁺.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2016)13-0151-06

Color Image Watermark Algorithm Robust to the Print-and-Scan Process

XIE Yong, TAN Hai-hu, WANG Kai-li, LIU Lin
(Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, China)

ABSTRACT: To design a robust blind watermarking scheme that is suitable for print-and-scan color image, a dual-transform domain watermarking algorithm was put forward based on discrete wavelet transform (DWT) and quaternion discrete Fourier transform (QDFT). Digital hologram watermarking information was scattered and imbedded into the low-frequency part of three color components of the color host image without visible distortion. Meanwhile the algorithm was blindly extracted. Experiment results showed that the proposed algorithm met the invisibility requirements and was resistant to printing-and-scanning attack. The dual-transform domain watermarking algorithm based on discrete wavelet transform and quaternion discrete Fourier transform retains the advantages of two transform domains in processing of color image, and has better performance in the field of print-and-scanning color image.

KEY WORDS: QDFT; DWT; dual-transform domain; print-and-scan

将数字水印防伪技术应用到印品防伪中, 具有难仿制、易识别、成本低、无公害的特点, 应用前景广阔。而这一类的水印技术面对的最大挑战, 就是在防伪机制实现中所必须经历的打印扫描过程对水印防伪信息造成的高强度的组合攻击。在抗打印扫描水印研究领域, 经过十几年的研究已经取得了一定的研究成果。宋玉杰^[1]通过将水印信息转换

成 ASCII 码, 通过阈值修改嵌入到图像亮度分量的 DCT 系数中, 实现了算法的抗打印扫描。牛少彰^[2]等人利用图像打印扫描前后 DCT 系数的稳定特征关系进行了水印嵌入, 获得了较好的提取效果。孙云峰^[3]提出了将傅里叶计算全息水印技术应用到彩色图像印刷防伪中。黄素娟^[4]提出了将全息水印信息自适应嵌入到宿主图像的离散傅里叶变换

收稿日期: 2015-12-25

基金项目: 国家自然科学基金 (61170101); 湖南省研究生创新科研项目 (CX2015B562)

作者简介: 谢勇 (1964—), 男, 湖南攸县人, 湖南工业大学教授, 主要研究方向为功能包装材料、包装防伪技术。

(DFT)幅度谱中的水印方案,并提出了基于DFT及边缘检测的旋转校正方法,该方案可以很好地抵抗打印扫描攻击。吴清乐等^[5]提出了一种数字全息双水印离散傅里叶变换(DFT)域算法,相比与黄素娟等人的算法有所改进,通过修改DFT中频系数并在对称块做相应替换,取得了更好的水印不可见性。谢勇^[6]等人提出了一种小波域的全息水印方案,并且提出了一种几何校正方案,并将该算法的应用拓展到了彩色图像中,并进行了硬拷贝实验验证。刘真^[7]等人提出了一种基于改进的全息方法的haar小波域的抗打印扫描算法。这些算法的抗打印扫描攻击能力都有较好的突破,但是均是针对灰度图像进行设计,而实际应用中彩色图像才是印品图像出现的主要形式。此类算法难以应对色彩空间转换的问题,尤其是将其运用在硬拷贝彩色图像中^[8-10]。由于四元数虚部之间的固有相关性与彩色图像颜色通道之间的色彩相关性具有很好一致性,在四元数变换域中的水印算法也取得了一定的进展^[11-14]。Sun^[11]等人提出了一种基于奇异值分解(SVD)及四元数傅里叶变换(QDFT)的半盲水印算法。Chen^[12]等人结合量化索引调制(QIM)的方法充分利用四维四元数频域,极大地提高了算法的水印容量。Ouyang^[13]等人提出的基于四元数傅里叶变换及改进的标准对数极坐标映射的水印算法,极大地提高了旋转校正的精度,更进一步提高了算法的抗几何攻击鲁棒性,整体式嵌入方式增强了算法抗信号处理攻击的鲁棒性。王卫江^[14]等人,提出了一种基于失真补偿的QIM方法在QDFT域中嵌入水印,算法的鲁棒性较传统的QIM方式有所增强。这类算法集中在宿主图像的四元数傅里叶变换域中,而基于四元数傅里叶变换的水印算法应用到打印扫描彩色图像上的研究则鲜见报道。

文献[6]所提DWT域全息水印算法原理简单,应用于印刷扫描图像也有一定效果,但其处理彩色图像时的方式还有改进之处,为此文中探究了利用四元数在处理彩色图像时的优势,提出了一种双变换域全息^[15]水印算法,并沿用该算法的设计思路,使算法在彩色打印扫描图像上的应用取得更好效果。

1 算法描述

1.1 四元数傅里叶变换

四元数傅里叶是在复数域中进行,所以对彩色

宿主图像进行四元数傅里叶变换得到的每一部分系数都蕴含了原图像所有通道的特征,因此,以改变四元数傅里叶变换系数的方式嵌入水印,水印信息将会分布原宿主图像的各个通道中。文中在进行算法设计时就是应用了四元数域变换的这一特性,以达到更好的不可见性。在矩阵进行四元数变换后,实部具有偶对称性质,为使逆变换后的矩阵仍为纯四元数矩阵,以保证水印的不可见性,水印信息须嵌入在四元数实部。文中运用的四元数傅里叶变换为下述的四元数傅里叶左变换。

在处理彩色图像的过程中,RGB三通道彩色图像 $q_{(m,n)}$ 通常被表示成纯四元数矩阵。

$$q_{(m,n)} = 0 + R_{(m,n)}i + G_{(m,n)}j + B_{(m,n)}k \quad (1)$$

由于四元数不满足交换律,所以四元数傅里叶变换被分为3类,左变换、右变换及双变换。四元数傅里叶左变换的形式如下:

$$Q^L(u,v) = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} e^{-\mu 2\pi i \left(\frac{mu}{M} + \frac{nv}{N}\right)} q(m,n) \quad (2)$$

左边变换的逆变换形式如下:

$$q(m,n) = Q^{-L} = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} e^{2\pi i \left(\frac{mu}{M} + \frac{nv}{N}\right)} Q(u,v) \quad (3)$$

1.2 离散小波变换

图像经过离散小波变换,分解为4个子图:低频近似子图、水平高频细节图、垂直高频细节图和对角线高频细节图。每个子图通过间隔抽样滤波得到,而后可继续将低频近似子图进行下一级分解,如此,图像可被分解成不同分辨率和不同方向上的多个子图,这些不同的子图区域对应人眼视觉的不同的敏感程度。这些特征区域可以为水印嵌入位置提供多种选择以满足不同的需要。文中设计的算法是针对打印扫描图像,图像的失真主要集中在图像的细节上,所以选择了离散小波的低频近似子图作为嵌入位置。直接对图像小波低频系数的修改往往容易引起可察觉的视觉失真,文中利用了四元数傅里叶变换的优势,将原宿主图像的3个颜色分量的低频系数作为整体进行修改,这样能够最大限度地降低了图像失真。算法设计中2次使用了小波变换,第1次使用是为了挑选出鲁棒性强的区域作为嵌入位置,第2次是将小波变换应用在四元数傅里叶变换的实部系数上,以替换嵌入的方式嵌入水印信息,这样可以尽量保留水印信息自身的相关性以

更好地抵抗打印扫描过程中的非线性攻击。

通常，连续小波变换中的尺度因子 a 和平移因子 b 的离散化式分别取作 $a = a_0^j$, $b = ka_0^j b_0$, $j \in Z, a_0 > 0$, 则对应的离散小波函数 $\psi_{a,b}(t)$ 为:

$$\psi_{j,k}(t) = a_0^{-\frac{j}{2}} \psi\left(\frac{t - ka_0^j b_0}{a_0^j}\right) = a_0^{-\frac{j}{2}} \psi(a_0^{-j}t - kb_0)$$

$$j, k \in Z \quad (4)$$

而离散化小波变换系数 $C_{j,k}$ 可表示为:

$$C_{j,k} = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi_{j,k}^*(t) dt = \langle f, \psi_{j,k} \rangle \quad (5)$$

其重构式为:

$$f(t) = C \sum_{j=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} C_{j,k} \psi_{j,k}(t) \quad (6)$$

式中: C 为常数。

1.3 嵌入算法

1) 第 1 次小波处理。将 RGB 模式下的彩色宿主图像进行分通道处理, 将每个颜色分量的灰度图进行一次 Haar 小波分解, 取每个分量的低频逼近子图, 按式 (1) 表示成一个实部为 0 的纯四元数矩阵, RGB 三色分量各自的低频子图分别作为四元数矩阵的 3 个虚部系数。

2) 四元数傅里叶变换。对三色通道分量低频子图的四元数矩阵按式 (2) 做四元数傅里叶左边变换, 取四元数傅里叶变换系数的实部系数作为水印嵌入位置。

3) 第 2 次小波处理。将待嵌入的水印信息 $W(x,y)$ (大小为 $n \times n$) 制成傅里叶全息图 (大小为 $2n \times 2n$), 取对角高频子图作为待嵌入的水印信息 $w(x,y)$ (大小为 $n \times n$), 对 (2) 中得到的实部系数也进行离散小波变换, 将全息水印信息替换其对角高频系数, 然后进行小波重构得到含有水印信息的实部系数。

4) 图像重构。将含水印的实部系数与未更改的虚部系数表示成四元数矩阵进行逆四元数傅里叶左变换, 得到含有水印信息的 3 个低频系数, 随后进行逆小波重构得到含水印信息的 3 个颜色分量, 最后进行通道合成得到含水印的彩色图像。水印嵌入算法的流程图见图 1。

1.4 水印提取

1) 小波处理。将待检测的图像分通道处理, 对每一通道分量进行小波分解, 取 3 个低频小波系

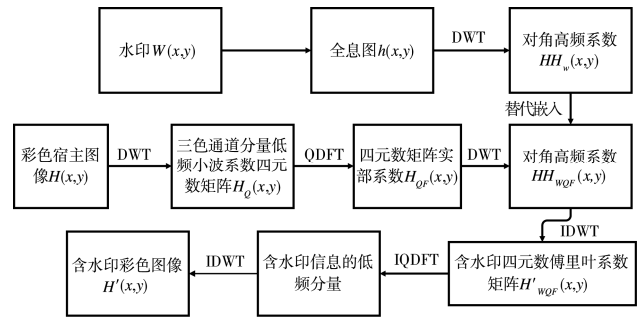


图 1 水印嵌入算法

Fig.1 Watermark embedding algorithm

数矩阵作为虚部, 表示成纯四元数矩阵;

2) 全息水印提取。对四元数矩阵进行 QDFT 变换, 取实部系数进行离散小波变换, 然后对对角高频系数进行傅里叶全息复现得到最终提取的水印信息。水印提取算法的流程图见图 2。

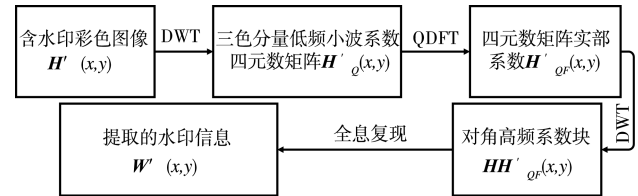


图 2 水印提取算法

Fig.2 Watermark extraction algorithm

2 算法性能测试

宿主图像为 RGB 色彩模式的非标准测试图 " Iris " 和 " Tulip ", 以及标准测试图 " Peppers " 和 " Lena " 大小为 1024×1024 像素, 水印信息为二值图像信息 " beetle " 大小为 128×128 像素, 见图 3。



图 3 宿主图像及水印信息

Fig.3 Color host image and watermark information

2.1 打印扫描实验

为了客观评价水印嵌入对宿主图像的影响及水印提取的质量,引入水印领域常用的 PSNR 及 NC 值作为算法透明性及鲁棒性的评价指标。文中设计的算法主体方法为小波域的水印算法,其主要特点在于结合了四元数傅立叶变换在处理彩色图像中的优势——可将彩色图像的多通道作为整体处理,保留色彩相关性的特点。为验证这种结合 DWT 及 QDFT 算法的优势,采用文献[6]一种单纯的小波域的全息水印方案作为参照方案。为提高可比性,参照算法与文中算法在嵌入参数选择上均以含水印图像 PSNR 值接近 35 dB 为准。文献[6]对于彩色图像的处理是对单个通道处理,而嵌入通道的选择可能会影响算法的性能,因此,为消除嵌入通道的选择上对算法性能造成的影响,实验中对 RGB 3 个通道分别做了嵌入。2 种算法嵌入水印信息后的 PSNR 值见表 1。

打印扫描的实验仪器及参数设置如下:打印机,爱普生 L1800 彩色喷墨打印机;扫描仪,佳能 9000F;打印纸, Fantac 厚型彩色喷墨打印纸,纸张定量为 120 g/m²。

表 1 水印嵌入后图像 PSNR 值
Tab.1 The PSNR values of watermarked images

| | 文献[6]-R | 文献[6]-G | 文献[6]-B | Proposed |
|---------|---------|---------|---------|----------|
| Iris | 35.4248 | 35.3958 | 35.5034 | 35.4640 |
| Lena | 35.5272 | 35.4078 | 35.3788 | 35.4611 |
| Peppers | 35.4422 | 35.3310 | 35.3636 | 35.5156 |
| Tulip | 35.3440 | 35.4957 | 35.4989 | 35.7484 |

文中所提算法嵌入水印后的图像见图 4,对比图 3 中的原宿主图像水印嵌入并未造成可见的图像降质。含水印图像的打印扫描结果见图 5,对比图 4 可看出打印扫描过程造成了严重的色彩失真。

2.2 实验结果分析

从打印输出的含水印图像的扫描结果中提取得到水印信息提取结果及其对应的 NC 值,见表 2。从打印扫描的实验结果可知,文中所提算法具备抗打印扫描攻击的能力,水印提取质量普遍好于对比算法;相对于对比算法的改进之处在于,不需要进行水印嵌入通道的选择,水印提取质量更加稳定,应用方便。

实验结果分析表明,在低嵌入强度保证高 PSNR

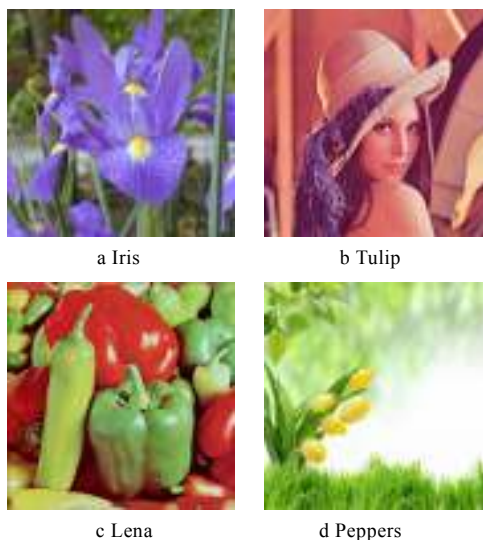


图 4 水印嵌入后的宿主图像
Fig.4 Host images after watermarked

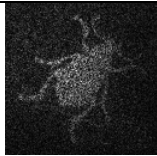
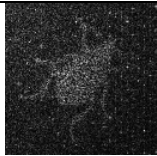
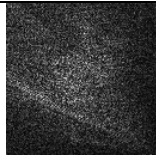

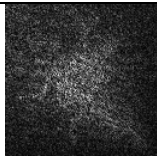
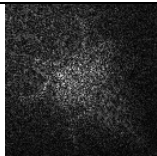
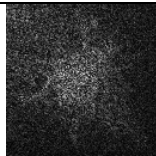
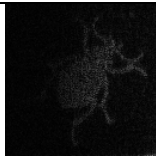
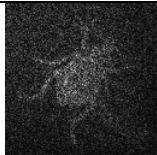
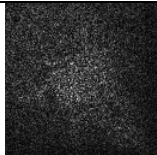
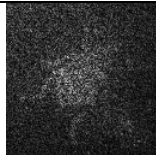
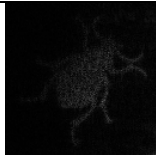
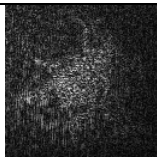
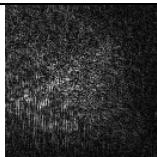
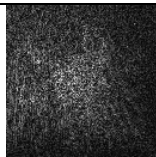
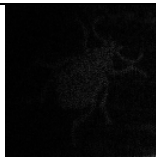


图 5 打印扫描后的含水印图像
Fig.5 Watermarked images after print-and-scan

值的情况下,适用于灰度图像的硬拷贝水印嵌入算法应用于彩色图像时并不适用,这是由于彩色图像在硬拷贝输出时,由于色彩模式的转换会存在更多的色彩失真,灰度图像水印算法的水印信息分散在一个通道中,遭受的攻击强度大。彩色图像的色彩失真度还跟图像的颜色分布有关,所以嵌入通道的选择会影响水印提取质量,普遍的通道选择依据是人眼对蓝色不敏感,所以选择 B 通道作为嵌入通道,而从实验结果可以看出,水印提取质量并不理想。文中所提算法保留了小波变换在处理硬拷贝输出图像时,可以很好地去掉半色调噪声的特点,将水印信息嵌入在了图像小波分解的低频部分,同时巧妙地结合了四元数处理方法,很好地将水印信息分散到了 3 个颜色通道中,因而能够在保证宿主图

像低失真度的条件下, 嵌入更多的水印信息, 以此 提高了水印算法的抗打印扫描攻击能力。

表 2 从打印扫描的含水印图像中恢复的水印信息
Tab.2 The watermark information extracted from print-and-scan watermarked images

| | 文献[6]-R | 文献[6]-G | 文献[6]-B | Proposed |
|---------|----------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Iris |  0.7849 |  0.6930 |  0.6610 |  0.7622 |
| Lena |  0.7159 |  0.7164 |  0.7044 |  0.7480 |
| Peppers |  0.7337 |  0.6808 |  0.7001 |  0.7796 |
| Tulip |  0.7073 |  0.6455 |  0.6762 |  0.7475 |

3 结语

提出了一种抗打印扫描的鲁棒性彩色图像水印算法, 充分利用了 DWT 及 QDFT 这 2 种变换方法的优点, 同时结合了全息技术在提高算法鲁棒性的特点。算法第 1 次小波变换的应用, 可以将宿主信息的易受攻击的高频部分与不易受攻击的低频部分进行区分, 四元数可以将具有相关性的几个颜色分量特征同时进行处理, 实现了全息水印信息同时分散到 3 个颜色通道中, 第 2 次小波的使用利用了小波变换具有的全局性特征, 使水印信息分散到了整个四元数傅里叶变换系数实部的整个区域。算法沿用了 DWT 域全息水印的设计思路, 保留了该方法抗打印扫描攻击鲁棒性的同时, 引入了四元数的方法, 以改进其处理彩色图像时的方式, 实验结果表明, 改进具有较好效果。文中算法实现了盲提取, 提取过程不需要任何先验知识算法效率高。这一双变换域的水印方法更好地实现了水印算法鲁棒性与透明性之间的平衡, 打印扫描实验结果也表明, 其具有很好的抗攻击的能力, 可以应用于印品水印防伪领域。

参考文献:

- [1] 宋玉杰, 刘瑞祯. 数字水印技术在印刷品防伪中的应用[J]. 中国图象图形学报, 2001, 6(5):450—454.
SONG Yu-jie, LIU Rui-zhen, TAN Tie-niu, et al. Digital Watermarking for Forgery Detection in Printed Materials[J]. Journal of Image and Graphics, 2001, 6(5):450—454.
- [2] 牛少彰, 伍宏涛, 谢正程, 等. 抗打印扫描数字水印算法的鲁棒性[J]. 中山大学学报:自然科学版, 2004, 43(A2):1—4.
NIU Shao-zhang, WU Hong-tao, XIE Zheng-cheng, et al. Robustness Investigation of Digital Watermarking Algorithm for Print-and-scan Process[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2004, 43(A2):1—4.
- [3] 孙云峰, 翟宏琛, 杨晓苹, 等. 傅里叶计算全息数字水印在彩色图像印刷防伪中的应用[J]. 光电子·激光, 2008, 19(7):952—955.
SUN Yun-feng, ZHAI Hong-chen, YANG Xiao-ping, et al. Application of Fourier CGH Digital Watermarking Technique in Color Image Forgery-Prevention Printing[J]. Journal of Optoelectronics. Laser, 2008, 19(7): 952—955.
- [4] 黄素娟, 王杜瑶, 任艳丽. 基于数字全息及失真校正

- 的抗打印扫描数字图像水印[J]. 应用科学学报, 2011, 29(3):281—288.
- HUANG Su-juan, WANG Du-yao, REN Yan-li. Print-scan Resilient Watermarking Based on Digital Hologram and Distortion Correction[J]. Journal of Applied Science-electronics and Information Engineering, 2011, 29(3):281—288.
- [5] 吴清乐, 彭代渊. 基于离散傅里叶变换的数字全息水印[J]. 计算机应用, 2013, 33(3):752—755.
- WU Qing-le, PENG Dai-yuan. Digital Hologram Watermarking Based on Discrete Fourier Transform[J]. Journal of Computer Applications, 2013, 33(3):752—755.
- [6] 谢勇, 李娟, 王娟娟. 一种抗印刷-扫描倾斜失真的数字水印算法[J]. 包装工程, 2013, 34(15):104—108.
- XIE Yong, LI Juan, WANG Juan-juan. A Kind of Printing and Scanning Tilt Distortion Resistant Digital Watermarking Algorithm[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(15):104—108.
- [7] 刘真, 白韬韬, 卢鹏. 一种解密图像无背景噪声的加密全息数字水印技术[J]. 光学学报, 2015(2):88—95.
- LIU Zhen, BAI Tao-tao, LU Peng. Encrypted Holographic Watermarking Technology with Decrypted Image Superposed No Noise[J]. Acta Optica Sinica, 2015(2):88—95.
- [8] XIE Yong, YUAN Yi, TAN Hai-hu, et al. Effect of Embedding Way on Printed Watermarking Image by Lithography[C]// Cyber-Enabled Distributed Computing and Knowledge Discovery(CyberC), Shanghai. IEEE, 2014:286—289.
- [9] XIAO Ying-ze. ZHANG Wen. XIE Yong. Influence of Different Color Space on Digital Watermarking for Anti-counterfeiting Printed Images[C]// Control and Decision Conference (CCDC), Qingdao. IEEE, 2015: 1535—1539.
- [10] XIE Yong, SHAN Wu-Yang, FENG Qi-qing, et al. Performance Comparison of Holographic Watermarking for Color Images in RGB and CMYK Channels[C]// 25th Chinese Control and Decision Conference (CCDC), Guiyang, 2013:3024—3027.
- [11] SUN Jing, YANG Jing-yu. A Secure Color Images Watermarking Algorithm Based on Holistic Quaternion Operation[J]. Advances in Information Sciences & Service Sciences, 2011, 3(10):363—374.
- [12] CHENG Bei-jing, COATRIEUX G., CHEN Gang, et al. Full 4-D Quaternion Discrete Fourier Transform Based Watermarking for Color Images[J]. Digital Signal Processing, 2014, 28(1):106—119.
- [13] OUYANG Jun-lin, COATRIEUX G, CHEN Bei-jing, et al. Color Image Watermarking Based on Quaternion Fourier Transform and Improved Uniform Log-polar Mapping[J]. Computers & Electrical Engineering, 2015, 46:419—432.
- [14] 王卫江, 安玛丽, 闫道伟, 等. 基于超复数傅里叶变换的彩色图像水印算法[J]. 北京理工大学学报, 2015, 5(5):533—537.
- WANG Wei-jiang, AN Ma-li, YAN Dao-wei, et al. A Watermarking Algorithm of Color Images Based on Quaternion Fourier Transform[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2015, 35(5):533—537.
- [15] 陈蔓丽, 狄红卫. 傅里叶计算全息图的数字再现及混叠的消除[J]. 光学技术, 2007, 33(3):364—366.
- CHEN Man-li, DI Hong-wei. Digital Reconstruction of Fourier CGH and the Elimination of Aliasing Image[J]. Optical Technique, 2007, 33(3):364—366.