

包装印刷

基于四元数离散傅里叶变换的全息数字水印算法

于海娇, 孙刘杰, 李毓彬, 包观笑

(上海理工大学, 上海 200093)

摘要: **目的** 结合四元数和全息技术的优势, 将数字水印技术应用在彩色图像中, 以提高水印算法的抗攻击能力。 **方法** 将四元数离散傅里叶变换和加密傅里叶全息技术应用到数字水印算法。首先对一幅彩色图像进行数据类型的转换, 表示成四元数矩阵, 然后对其进行四元数离散傅里叶变换, 最后基于人眼视觉特性将水印信息加密后利用重复计算选取合适的嵌入强度后嵌入变换得到的频域矩阵中, 实现信息隐藏。 **结果** 算法能够将彩色图像作为一个整体进行处理, 有较好的不可见性。与此同时, 提高了四元数域水印对于裁切攻击的抵抗能力。 **结论** 该算法在保证水印不可见性的同时能够抵抗一定程度的攻击, 满足数字防伪以及版权保护的需要。

关键词: 数字水印; 彩色图像; 四元数离散傅里叶变换; 傅里叶全息

中图分类号: TS807; TS851 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2016)09-0103-05

Digital Watermark Algorithm with Encrypted Fourier Holography Based on Quaternion Discrete Fourier Transform

YU Hai-jiao, SUN Liu-jie, LI Yu-bin, BAO Guan-xiao

(University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

ABSTRACT: A new method based on the advantages of quaternion and encrypted Fourier holography was put forward to improve the robustness against attacks and it was used for color image watermark embedding and extraction. The quaternion discrete Fourier transform and encrypted Fourier holography were applied in digital watermark algorithm. At first, the color image was represented in the form of quaternion matrix by translating the data type, and then subjected to quaternion discrete Fourier transform. At last, the hologram was embedded into frequency matrix with an appropriate coefficient which was obtained by repeated calculation on the basis of human visual system. The experiments showed that the method had good performance in invisibility and disposed the host color image as a whole. Meanwhile, it also improved the robustness against cut attacks in quaternion domain watermarking. The watermarking algorithm met the demand of invisibility and robustness and was effective in digital anti-counterfeiting and copyright protection.

KEY WORDS: digital watermark; color image; quaternion discrete Fourier transform; Fourier holography

数字技术使存储、复制与传播多媒体信息(图像、文本、音频和视频等)变得非常方便, 在有益于人类发展的同时, 带来了盗版以及版权归属权的问题。数字水印技术的产生与发展已经为相关问题的解决提供了一个很好的方式。数字水印技术是一种用于证明

数字作品的版权真实性、跟踪盗版行为或者提供产品的附加信息的特殊的隐藏技术, 嵌入产品的水印信息不会影响产品的可观性和完整性。

国内外的学者在对数字水印的研究中取得了很多成绩。目前, 数字水印的载体有文字、图像、音频、

收稿日期: 2015-08-03

基金项目: 上海市教委科研创新重点项目(13ZZ111)

作者简介: 于海娇(1990—), 女, 内蒙古呼伦贝尔人, 上海理工大学硕士生, 主攻数字水印和图像处理。

通讯作者: 孙刘杰(1965—), 男, 安徽怀宁人, 博士, 上海理工大学教授, 主要研究方向为数字水印和图像处理。

视频等。对于以图像为载体的数字水印算法,大多使用灰度图像,不过在实际生活和学习中,人们更多地使用彩色图像。现有的彩色图像算法基本有3种:获取一种颜色模式下彩色图像的单通道或者单个颜色分量的信息进行水印嵌入;前一种的升华,将处理后的所有单通道进行合成;由英国学者 Sang Wine 首次提出的基于四元数理论的算法^[1]。用四元数将彩色图像表示成一个矢量整体,在后续处理中能够保持各个彩色通道的光谱特性。目前,这个数学模型逐渐发展,已经应用在彩色图像的去噪、边缘检测、压缩和编码等领域,真正把四元数应用在数字水印领域的时间并不是很长。国内学者中,从2009年开始,江淑红^[2]提出一种快速算法,并且利用量化索引的办法将数字水印嵌入变换后系数的实部中,一定程度上改进了水印图像的视觉不可感知性,但是鲁棒性还有很大欠缺。到2014年,冯银波^[3]提出一种基础四元数离散傅里叶变换和四元数离散余弦变换以及四元数奇异值分解的双重水印算法^[4],实现不可见性和鲁棒性的良好结合。通过研究他们的成果,可以发现,关于四元数域的数字水印算法,抗剪切效果均不佳,有待进一步提高。这里在现有的四元数域的水印算法基础上,结合全息图频谱的不可撕毁性和很强的抵抗像素非线性调整攻击能力提出自己的算法。

1 关键技术

1.1 加密傅里叶全息技术

加密傅里叶全息技术^[5-7]是一种更高效的加密技术,它融合了现在常用的2种加密技术:傅里叶全息技术和双随机加密技术。水印信息经过加密全息处理后,没有密钥不能成功获得加密信息,因此安全性更高。为了增强全息干涉条纹的清晰度,先将物光和参考光进行归一化处理后再进行全息记录。

原始待加密的水印图像 $f(x,y)$,用随机相位模板进行调制,经过傅里叶变换透镜在其频谱面上进行傅里叶变换,再经过相位模板进行相应的调制。此时可以用处理好的物光和参考光进行全息记录得到同轴全息图像 $H(x,y)$:

$$\begin{aligned} H(x,y) &= |A(x,y)|^2 \exp[j\phi(x,y) + \phi_0] + \exp(j\phi_0) |f(x,y)|^2 + \\ &= 1 + |A(x,y)|^2 + A(x,y) \exp[j\phi(x,y)] + \\ &= A(x,y) \exp[-j\phi(x,y)] \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $A(x,y)$ 是双随机加密得到的图像的振幅信

息, $\exp[j\phi(x,y)]$ 和 $\exp[-j\phi(x,y)]$ 是加密同轴全息图像的相位信息, $\exp(j\phi_0)$ 是同轴参考光的相位,其中 ϕ_0 为某一常数。

再对 $H(x,y)$ 进行滤波处理,就可以得到加密同轴全息图像 $H(x,y)$:

$$\begin{aligned} H(x,y) &= A(x,y) \exp[j\phi(x,y)] + \\ &= A(x,y) \exp[-j\phi(x,y)] \end{aligned} \quad (2)$$

加密傅里叶全息技术的解密过程是加密过程的整个逆变换过程。

1.2 四元数以及彩色图像的四元数表示

四元数的概念是在1843年由爱尔兰数学家首次提出的,四元数是根据普通的复数推广而来的,在超复数中是最简单的一员。四元数的定义如下:

$$q = a + bi + cj + dk \quad (3)$$

式中: q 为四元数, a, b, c, d 是实数, i, j, k 为虚数,当 $a=0$ 时, q 称为纯四元虚数,通过 i, j, k 之间的关系可以发现,四元数的乘法不满足交换律, i, j, k 之间的关系满足:

$$i^2 = j^2 = k^2 = -1 \quad (4)$$

$$ij = -ji = k, jk = -kj = i, ki = -ik = j \quad (5)$$

在RGB颜色模式下,彩色图像的每一个像素都是RGB这3个分量按不同强度混合叠加组成的,可以通过对应关系把一幅彩色图像表示成四元数矩阵。首先,彩色图像在点 (x,y) 处的像素值 $R(x,y), G(x,y), B(x,y)$ 可以表示成一个纯四元数 $f(x,y)$:

$$f(x,y) = R(x,y)i + G(x,y)j + B(x,y)k \quad (6)$$

同理,将一幅 $M \times N$ 的彩色图像 A 表示成一个 $M \times N$ 的纯四元数矩阵,如下所示:

$$A = \begin{bmatrix} f(0,0) & f(0,1) & \cdots & f(0,N-1) \\ f(1,0) & f(1,1) & \cdots & f(1,N-1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f(M-1,0) & f(M-1,1) & \cdots & f(M-1,N-1) \end{bmatrix} \quad (7)$$

由此,图像 A 通过这种方式就被表示成四元数矩阵的形式。这样可以让彩色图像的3个分量整体变化,能够保持各个分量之间固有的光谱联系。在水印嵌入时,能真正把彩色载体图像作为一个矢量整体来处理。

1.3 四元数离散傅里叶变换

四元数离散傅里叶变换^[8-11]QDFT有3种形式,分别为左变换、右变换和双边变换,这是根据四元数乘法不可交换的性质决定的。这里在试用3种变换后,

发现左变换的效果最好。四元数的傅里叶变换的左变换为:

$$F_L(u, v) = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} e^{-\mu 2\pi(\frac{x}{M} + \frac{y}{N})} f(x, y) \quad (8)$$

式中:下标L表示左变换;\$(u, v)\$代表图像频域中的坐标;\$\mu\$是正交单位纯四元虚数,可以任意定义。它的逆变换为:

$$f(x, y) = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} e^{\mu 2\pi(\frac{x}{M} + \frac{y}{N})} F(u, v) \quad (9)$$

在与图像处理有关时,一般采用离散形式的傅里叶变换^[12-15]。其中,Sang Wine在四元数离散傅里叶变换问题上有自己的研究,利用“平行垂直分解”变换法将其转化,把四元数沿着某个方向\$\mu\$分解为平行分量和水平分量,然后将水印信息嵌入平行方向。

由参考文献[4]可知,要实现在四元数的频域进行水印的嵌入,必须保证逆变换到空间域的四元数是实部为0的纯四元虚数。这里选取\$\mu=(i+j+k)/\sqrt{3}\$,按照对称系数的修改方法,在中频选取一定的系数,修改对称系数的值后,进行水印信息的嵌入。这样使得嵌入水印不易被察觉,含水印图像没有不必要的失真,实现了数字水印对于不可见性的要求。

2 水印的嵌入和提取

2.1 水印的嵌入

实验选用RGB模式的\$512 \times 512\$像素大小的Lena彩色图像作为载体图像,见图1a,将文字信息“印刷光学”作为版权标识信息,见图1b,通过加密傅里叶全息技术进行加密后生成加密全息图像,大小为\$128 \times 128\$像素,见图1c。

1) 选定彩色Lena图像作为载体图像,并将其表示成四元数矩阵的形式;



图1 水印的嵌入

Fig.1 Embedding of watermark

2) 对得到的四元数矩阵进行四元数离散傅里叶

变换,选取其中频系数;

3) 根据人类视觉特性(简称HVS),选择嵌入系数,利用乘性原则将加密全息图像作为水印进行嵌入;

4) 对嵌入后获得的系数进行对称性修改后,进行四元数离散傅里叶反变换,得到含水印图像。

2.2 提取水印

原始载体图像见图2a,提取水印图像见图2b,解密的版权标识信息见图2c。

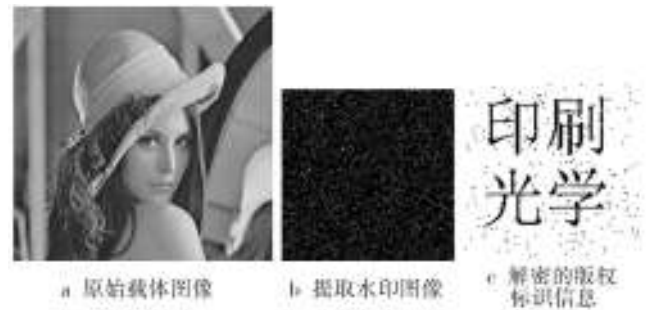


图2 提取水印

Fig.2 Watermark extraction

- 1) 对含水印图像进行四元数离散傅里叶变换;
- 2) 根据嵌入算法处理提取出的中频系数,得到水印信息;
- 3) 将得到的水印图像进行解密,获得版权标识信息。

3 实验结果与分析

3.1 水印的评价指标

数字水印算法的评价指标有许多种,经常采用的有峰值信噪比(PSNR)以及归一化相似度(NC值)。

峰值信噪比一般是作为评价水印不可见性的指标。一幅\$M \times N\$大小的Lena图像,嵌入水印后与原始图像的PSNR系数表示如下:

$$PSNR = 10 \lg \frac{255^2 MN}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (I(i, j) - I_w(i, j))^2} \quad (10)$$

式中:\$I_w(i, j)\$表示嵌入水印后图像的RGB分量的像素值;\$I(i, j)\$表示原始水印图像的RGB分量的像素值。其中,PSNR的单位为dB,值越大,证明失真越小,该算法充分满足了人眼视觉要求,有很好的效果。一般来说,主观上可以忍受的图像的峰值信噪比在20 dB以上。

为衡量提取后的水印和原始水印图像的相关程度,采用归一化相似度(NC值)进行客观评价。同样

是对于一幅 $M \times N$ 大小的 Lena 图像,公式如下:

$$NC = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N w(i,j)w'(i,j)}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N w(i,j)w(i,j)} \quad (11)$$

式中: $w(i,j)$ 为算法原始使用的水印,用 $w'(i,j)$ 表示重建的水印信息。相关程度表示了重建图像的质量效果,并且正相关。NC 值越大,证明提取出来的水印质量越高,NC 值一般在 0 和 1 之间。

3.2 实验结果

原始彩色载体图像与嵌入水印后的载体图像

PSNR 值为 43.0 dB。提取的水印图像解密后,得到的版权标识信息与原始版权标识信息的 NC 值为 0.99。实验结果表明,根据这里的算法,水印具有良好的不可见性,提取出的水印图像能用密钥正确译出其携带的版权标识信息。

算法在正常情况下的嵌入和提取表现良好,那么含水印图像遭遇各种攻击后,该算法能否重建清晰完整的水印信息是需要进行验证的。这里对含水印图像进行了几种常见的攻击,其中包括不同的噪声攻击、增强对比度、滤波和高斯低通以及剪切攻击,而后计算出载体图像的 PSNR 值与水印图像的 NC 值,实验结果图像见图 3。



图3 受到攻击后的载体图像和提取的水印图像

Fig.3 The attacked host images and the extracted watermark images

上述采取的攻击形式是图像在传输过程中经常能够遭受的干扰。为了更加直观地评价这里的算法,

将实验结果列于表1中,可以看出,除了和文献[7]一样,能够抵抗噪声攻击、滤波攻击外,这里的算法在抗剪切方面有绝对的优势,能够达到3/4,并且提取出的水印可以很好地识别出版权标识信息。目前知道的四元数域的水印算法,在抗剪切方面,都只做到1/16,文献[8]也是只有1/16,文献[2]达到1/4。

表1 水印攻击实验结果
Tab.1 Experimental results of watermarking attacks

攻击方式	文中实验数据		文献[8]实验数据	
	PSNR/dB	NC值	PSNR/dB	NC值
高斯噪声(0,0.001)	33.09	0.98	33.24	0.99
中值滤波	36.48	0.72	34.07	0.76
剪切 1/16	41.82	0.99	35.97	0.96
高斯低通	40.99	0.99	39.95	0.99

4 结语

通过研究四元数域的数字水印算法,选取四元数离散傅里叶变换,将载体图像表示成四元数矩阵,经过变换在其频域添加水印。对于普通水印的四元数域水印算法,抗剪切能力不是很强,由此,对普通水印进行加密傅里叶变换,利用全息图频谱的不可撕毁性和很强的抵抗像素非线性调整抗攻击能力,实现水印算法的提高。实验结果表明,该算法能够抵抗常见的水印攻击,如高斯噪声、椒盐噪声、泊松噪声、斑纹噪声、高斯低通、中值滤波、对比度增强和剪切攻击。与同类算法相比,该水印算法在抵抗剪切攻击方法有较大的优势,同时,文中的算法针对的是彩色载体图像,实现了对数字版权的保护。

参考文献:

[1] SANG W. Fourier Transforms of Color Images Using Quaternion or Hypercomplex Numbers[J]. Electronics Letters, 1996, 32 (21):1979—1980.

[2] 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,2009,20(8):1077—1081.

JIANG Shu-hong, ZHANG Jian-qiu, HU Bo. An Adaptive Watermarking Algorithm in the Hypercomplex Space of a Color Image[J]. Acts Electronica Sinica, 2009, 20(8): 1077—1081.

[3] 陈善学,冯银波. 基于四元数域的彩色图像双重零水印算法[J]. 计算机应用与软件,2014,31(9):263—267.

CHEN Shan-xue, FENG Yin-bo. Double Zero-Watermarking Algorithm Based on Quaternion and for Color Images[J]. Com-

puter Applications and Software, 2014, 31(9):263—267.

[4] 陈善学,冯银波. 基于四元数模型和奇异值分解的图像水印算法[J]. 计算机应用,2013,33(6):1626—1629.

CHEN Shan-xue, FENG Yin-bo. Image Watermarking Algorithm Based on Quaternion and Singular Value Decomposition [J]. Journal of Computer Applications, 2013, 33 (6) : 1626—1629.

[5] 孙刘杰,李孟涛. 基于CMYK颜色空间的光全息水印算法研究[J]. 包装工程,2012,33(9):27—32.

SUN Liu-jie, LI Meng-tao. Study on Light Holographic Watermarking Algorithm Based on CMYK Color Space[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(9): 27—32.

[6] 孙刘杰,庄松林. 双随机相位加密同轴傅里叶全息水印防伪技术[J]. 光学学报, 2007, 27(4):621—624.

SUN Liu-jie, ZHUANG Song-lin. Forgery Prevention Based on In-Line Fourier Holographic Watermark with Double Random Phase Encryption[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27 (4) : 621—624.

[7] 孙刘杰,庄松林. 双随机相位加密全息标识防伪技术研究[J]. 光学学报,2007,27(1):31—34.

SUN Liu-jie, ZHUANG Song-lin. Anti-Fake Technique by Double Random Phase Encrypted Holographic Mark[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(1): 31—34.

[8] 孙菁,杨静宇,傅德胜. 彩色图像四元数频域奇异值分解水印算法[J]. 信息与控制,2014,33(7):144—148.

SUN Jing, YANG Jing-yu, FU De-sheng. Color Images Watermarking Algorithm Based on Quaternion Frequency Singular Value Decomposition[J]. Information and Control, 2014, 33 (7):144—148.

[9] 李策,李宝森,肖利梅,等. 超复数变换域的视感知内容数字水印算法[J]. 兰州理工大学学报,2011,37(6):83—87.

LI Ce, LI Bao-sen, XIAO Li-mei, et al. Watermarking Algorithm with Visual Perception Object in Hypercomplex Fourier Transform Domain[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2011, 37(6):83—87.

[10] 江淑红,张建秋,胡波. 一种超复数频域的有意义数字水印算法[J]. 系统工程与电子技术,2009(9):2242—2248.

JIANG Shu-hong, ZHANG Jian-qiu, HU Bo. Content Based Image Watermarking Algorithm in Hypercomplex Frequency Domain[J]. Systems Engineering and Electronics, 2009 (9) : 2242—2248.

[11] 孙菁,杨静宇. 四元数域彩色图像整体式水印算法[J]. 电子与信息学报,2012,34(10):2389—2395.

SUN Jing, YANG Jing-yu. Quaternion Based Holistic Color Images Watermarking Algorithm[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2012, 34(10):2389—2395.

[12] TSUI T K, ZHANG X P, ANDROUTSOS D. Color Image Watermarking Using Multi-dimensional Fourier Transforms[J].

模型与主观评价是正相关,而且 SSIM 和 MSSIM 的相关系数均处于 0.6~0.8 之间,说明结构相似度能够更好地、客观地评价印刷图像质量。MSSIM 的相关系数为 0.7698,比 SSIM 大 0.1343,表明多尺度结构相似度比单尺度结构相似度更加准确和客观。

参考文献:

- [1] 徐敏,郑元林. 基于 SSIM 的印刷图像质量评价研究[J]. 包装工程,2012,33(5):98—101.
XU Min, ZHENG Yuan-lin. Research of Printed Image Quality Based on SSIM[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(5):98—101.
 - [2] 蒋刚毅,黄大江,王旭,等. 图像质量评价方法研究进展[J]. 电子与信息学报,2010,32(1):219—226.
JIANG Gang-yi, HUANG Da-jiang, WANG Xu, et al. Overview on Image Quality Assessment Methods[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(1): 219—226.
 - [3] 朱大龙,明军. 基于结构失真的图像质量评价方法的研究[J]. 计算机技术与发展,2006(3):56—57.
ZHU Da-long, MING Jun. Research of Image Quality Assessment Based on Structural Distortion[J]. Computer Technology and Development, 2006(3):56—57.
 - [4] 佟雨兵,张其善,祁云平. 基于 PSNR 与 SSIM 联合的图像质量评价模型[J]. 中国图象图形学报,2006,11(12):1758—1763.
TONG Yu-bing, ZHANG Qi-shan, QI Yun-ping. Image Quality Assessing by Combining PSNR with SSIM[J]. Journal of Image and Graphics, 2006, 11(12):1758—1763.
 - [5] WANG Z, BOVIK A, SHEIKH H, et al. Image Quality Assessment: from Error Measurement to Structural Similarity[J]. Image Processing IEEE Trans, 2004, 13(4):600—612.
 - [6] 钱方,孙涛,郭劲,等. 基于小波变换的多尺度 SSIM 算法[J]. 液晶与显示,2015,30(2):317—325.
QIAN Fang, SUN Tao, GUO Jin, et al. Multi-scale SSIM Algorithm Based on Wavelet Transforms[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2015, 30(2):317—325.
 - [7] HAN S H, KIM D, PARK H R. Structural Information-Based Image Quality Assessment Using LU Factorization[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2009, 55(1): 165—171.
 - [8] WANG Z, SIMONCELLI P E, BOVIK C A. Multi-scale Structural Similarity for Image Quality Assessment[C]// IEEE Asilomar Conference Signals, Systems and Computers, 2003:1—4.
 - [9] CONZALEZ C R, WOODS E R. Digital Image Processing[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2012.
 - [10] PEDERSEN M, ZHENG Y L, HARDEBERG J Y. Evaluation of Image Quality Metrics for Color Prints[C]// 17th Scandinavian Conference on Image Analysis, Springer Verlag, 2011: 317—236.
 - [11] 刘长鑫,刘真,杨晟炜,等. PSNR 在网目调数字图像质量评价中的应用研究[J]. 包装工程,2012,33(7):108—111.
LIU Chang-xin, LIU Zhen, YANG Sheng-wei, et al. Application Study of PSNR in Quality Evaluation of Digital Halftone Image[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(7): 108—111.
 - [12] 张雷洪,唐波,李碧程,等. 基于 DWT-SVD 的强鲁棒全息水印算法研究[J]. 包装工程,2013,34(21):105—109.
ZHANG Lei-hong, TANG Bo, LI Bi-cheng, et al. Strong Robustness Holographic Watermarking Algorithm Based on DWT-SVD[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(21): 105—109.
 - [13] 熊顺清,王玉红,周卫红. 一种基于尺度不变特征变换 SIFT 的图像水印算法[J]. 云南民族大学学报,2012,21(5): 361—364.
XIONG Shun-qing, WANG Yu-hong, ZHOU Wei-hong. A New Anti-Geometric Attack Digital Watermarking Algorithm Based on SIFT Transform[J]. Journal of Yunnan University of Nationalities, 2012, 21(5):361—364.
 - [14] 廖琪男. 基于 SIFT 特征点匹配的水印图像几何校正算法[J]. 计算机应用研究,2011(6):2247—2249.
LIAO Qi-nan. New Watermarked Image Geometric Correction Algorithm Based on SIFT Feature Points Matching[J]. Application Research of Computers, 2011(6):2247—2249.
 - [15] 周中原,孙刘杰,王文举,等. 抗几何攻击的强鲁棒性全息水印研究[J]. 包装工程,2014,35(5):131—136.
ZHOU Zhong-yuan, SUN Liu-jie, WANG Wen-ju, et al. Holographic Digital Watermarking Algorithm against Geometric Attacks with Strong Robustness[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(5):131—136.
-
- (上接第 107 页)
- IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2008,3(1):16—28.
 - [13] LI C, LI B S, XIAO L M. A Watermarking Method Based on Hypercomplex Fourier Transform and Visual Attention[J]. Journal of Information & Computational Science, 2012(9): 4485—4492.
 - [14] WANG X Y, WANG C P, YANG H Y, et al. A Robust Blind Color Image Watermarking in Quaternion Fourier Transform Domain[J]. The Journal of Systems and Software, 2013, 86(2):255—277.
 - [15] CHENG C J, WANG W J, ZENG H Y, et al. A Fragile Watermarking Algorithm for Hologram Authentication[J]. Journal of Display Technology, 2014, 10(4):263—271.