

## 四元数域彩色图像整体式水印算法

孙菁<sup>\*①②</sup> 杨静宇<sup>②</sup>

<sup>①</sup>(南京信息工程大学滨江学院 南京 210044)

<sup>②</sup>(南京理工大学计算机科学与技术学院 南京 210094)

**摘要:** 该文提出一种结合四元数变换域和四元数分解方法的整体式彩色图像水印算法。首先对彩色载体图像进行分块四元数傅里叶变换得到其频域矩阵, 然后对频域单位小块进行四元数奇异值分解, 根据分解得到四元数酉矩阵前若干列中对角线元素的幅值构造水印序列, 并将水印隐藏到分解得到的实系数奇异值中。仿真实验表明, 该文提出的水印方法不仅可以把嵌入水印带来的误差扩散到载体图像的各个颜色分量上, 而且比传统的将彩色图像划分为各个单独色彩通道, 分别进行水印嵌入的方法不可见性更好, 并且, 通过构造与奇异值酉矩阵相关的水印序列可以有效解决现有四元数水印算法存在的误检测率以及水印图像易伪造问题。

**关键词:** 数字水印; 四元数; 奇异值分解; 误检率

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)10-2389-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.00789

## Quaternion Based Holistic Color Images Watermarking Algorithm

Sun Jing<sup>①②</sup> Yang Jing-yu<sup>②</sup>

<sup>①</sup>(Binjiang College, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

<sup>②</sup>(School of Computer Science and Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** This paper presents a blind color image watermarking scheme using the combination of the holistic transformation of Quaternion Fourier Transformation (QFT) and Quaternion Singular Value Decomposition (QSVD). The host image is first divided into blocks followed by taking the QFT of each block. Then design watermarks that use the diagonal elements of the two unitary matrices obtained from the followed QSVD of each block and add the watermarks into the singular values of each block. The specially designed watermarks strongly improve the false positive rate of randomly selected images. The real singular values got from QSVD contain both luminance and chrominance information of the color image that ensure the watermarks to spread into all color components in the spatial domain. Experimental results demonstrate that the proposed watermarking scheme performs better than traditional multi-channel watermarking scheme and the existing quaternion-based watermarking scheme in imperceptibility and false positive rate of randomly selected images respectively.

**Key words:** Digital watermarking; Quaternion; Singular value decomposition; False positive rate

### 1 引言

数字水印(digital watermarking)技术作为数字媒体作品知识产权保护的一种有效手段得到了广泛关注。目前大多数以静止图像为载体的水印算法都是针对灰度图像的, 现有的针对彩色图像的水印算法, 一般都是通过颜色模型转换, 将彩色图像划分为各独立通道(RGB, HSV, YCbCr 等等), 使用其中的某一通道(最常用的就是亮度通道<sup>[1]</sup>和蓝色人眼视觉不敏感通道<sup>[2]</sup>)来进行水印的嵌入; 要么对上

述方法稍微扩展, 在组成彩色图像的所有色彩通道中分别嵌入水印后再进行加成<sup>[3]</sup>。纵观以上两类方法, 要么没有完整利用彩色图像所有信息, 要么将彩色图像信息分割开, 不能体现彩色通道间的联系, 本质上都是灰度图像处理方法的扩展。

由于彩色图像的各色彩通道之间存在着强烈的光谱联系, 如果把一个彩色像素作为一个整体来处理, 那么像素各色彩通道间的光谱联系就会贯穿在对这个整体进行运算、处理的过程中。在对彩色图像整体式处理方法的研究中, 文献[4]首先引入了四元数概念。四元数把三色空间上的彩色图像视为一个矢量整体进行描述, 在运算空间以及保留彩色图像各通道间的相互关系上具有很大优势。该数学模

2011-07-29 收到, 2012-07-04 改回

国家自然科学基金(60973128)资助课题

\*通信作者: 孙菁 sunjing@nuist.edu.cn

型最早由文献[5]应用在了数字水印领域,文中使用已有的量化索引调制方法对四元数傅里叶变换(Quaternion Fourier Transform, QFT)在彩色图像水印中的应用进行了尝试,给出了四元数傅里叶变换最优参数。其后,文献[6]根据四元数域元素的特点设计了视觉掩模,将水印隐藏到彩色图像四元数傅里叶变换系数中,文献[7]将水印隐藏到四元数傅里叶系数的实部,文献[8]将水印隐藏到四元数傅里叶系数的幅值中,通过实验验证了相同嵌入容量下,四元数域算法确实具有比传统亮度域算法更好的鲁棒性。但是,由于基于四元数理论的彩色图像水印技术在国内的研究尚处于起步阶段,上述算法在设计中也难免存在一些疏漏,如对相同嵌入容量下,四元数域算法相对于传统算法的不可见性并未进行论证,并且,也并未对一些安全性问题,如:误检测率、易伪造性等进行考证。针对这个情况,本文在前人研究基础上,提出一种结合四元数变换域以及分解理论为一体的四元数频域奇异值分解彩色图像水印算法。首先对彩色载体图像进行分块四元数傅里叶变换得到其频域矩阵,然后对频域单位小块进行四元数奇异值分解,根据分解得到四元数酉矩阵前若干列中对角线元素的幅值构造水印序列,将水印隐藏到分解得到的实系数奇异值中。仿真实验表明,对彩色图像采用四元数模型进行整体式奇异值分解并嵌入水印的方法的确比同样步骤下单独通道方法得到的水印图像失真更小;并且通过在算法中增加奇异值分解过程,构造与奇异值酉矩阵相关的水印序列可以有效解决已有同类算法存在的误检测率问题。

## 2 彩色图像的四元数相关理论

### 2.1 彩色图像的四元数描述

四元数是复数在4维实空间的不可交换延伸,其理论体系早在19世纪40年代初由爱尔兰数学家Hamilton创立,但在相当长的一段时间里没有为人们所重视。直到1996年,英国科学家Todd, Ell和Sangwine提出了彩色图像的四元数模型,四元数在彩色图像上的应用研究开始发展。

一个四元数可以表示为

$$a_0 + a_1i + a_2j + a_3k \quad (1)$$

式中 $a_0, a_1, a_2, a_3$ 为实数, $i, j, k$ 为虚数单位, $i, j, k$ 之间的联系定义为

$$\left. \begin{aligned} i^2 = j^2 = k^2 = ijk = -1 \\ ij = -ji = k, jk = -kj = i, ki = -ik = j \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

从上述定义可以看出,四元数的乘法不满足交换律。

对于由RGB色彩模型表示的彩色图像 $f$ ,可以

用实部为零的纯虚四元数 $f^q = Ri + Gj + Bk$ 进行表示,其中 $R, G, B$ 分别表示彩色图像红、绿、蓝3种颜色分量的亮度值。

### 2.2 四元数傅里叶变换

四元数域的傅里叶变换因四元数乘法的非交换性而不能套用实数矩阵的常规方法来解决, Todd和Sangwine使用一种“平行(simplex)垂直(perplex)分解”变换法将待变换的四元数分解成平行于某个任意选定的单位纯虚四元数 $\mu_1$ 的复数分量 $A$ 和垂直于 $\mu_1$ 的二次复数分量 $B\mu_2$ ,将四元数傅里叶变换转化为二次复数的傅里叶变换问题。求解公式如式(3)<sup>[9]</sup>:

$$\begin{aligned} F^q(u, v) &= S \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} e^{-\mu_1 2\pi \left( \frac{xv}{M} + \frac{yu}{N} \right)} f^q(x, y) \\ &= S \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} e^{-\mu_1 2\pi \left( \frac{xv}{M} + \frac{yu}{N} \right)} (A + B\mu_2) \\ &= A_{\text{CFT}} + B_{\text{CFT}}\mu_2 \\ &= \text{Re}(A_{\text{DFT}}) + \text{Im}(A_{\text{DFT}})\mu_1 + (\text{Re}(B_{\text{DFT}}) \\ &\quad + \text{Im}(B_{\text{DFT}})\mu_1)\mu_2 \end{aligned} \quad (3)$$

其中 $S = \frac{1}{\sqrt{MN}}$ ,  $M, N$ 为图像的大小,  $f^q(x, y)$ 和 $F^q(u, v)$ 分别为彩色图像空域和频域的四元数表示,  $(x, y)$ 和 $(u, v)$ 为它们在空域和频域中的坐标。式中, $\mu_1$ 一般取为强度矢量 $(i + j + k)/\sqrt{3}$ ,这样,图像被分解为与 $\mu_1$ 轴平行的亮度(luminance)分量 $A$ 和与 $\mu_1$ 轴垂直的色度(chrominance)分量 $B\mu_2$ 。CFT, DFT分别表示复数和实数离散傅里叶变换,  $\text{Re}(\cdot)$ ,  $\text{Im}(\cdot)$ 分别代表取复数的实部和虚部。四元数傅里叶变换变成图像处理中常见的实数离散傅里叶变换的代数运算,可以看出四元数傅里叶变换的结果仍然是四元数。

计算四元数傅里叶逆变换需要按同样的原理,先将四元数函数 $F^q(u, v)$ 沿 $\mu_1$ 分解成两个二次复数:平行分量 $A'$ 和垂直分量 $B'\mu_2$ ,则逆变换有

$$\begin{aligned} f^q(x, y) &= S \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} e^{\mu_1 2\pi \left( \frac{xv}{M} + \frac{yu}{N} \right)} F^q(u, v) = f^q(x, y) \\ &= S \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} e^{\mu_1 2\pi \left( \frac{xv}{M} + \frac{yu}{N} \right)} (A' + B'\mu_2) \\ &= A'_{\text{ICFT}} + B'_{\text{ICFT}}\mu_2 \\ &= \text{Re}(A'_{\text{IDFT}}) + \text{Im}(A'_{\text{IDFT}})\mu_1 + (\text{Re}(B'_{\text{IDFT}}) \\ &\quad + \text{Im}(B'_{\text{IDFT}})\mu_1)\mu_2 \end{aligned} \quad (4)$$

式中, ICFT, IDFT分别表示复数和实数傅里叶逆变换。四元数傅里叶逆变换问题也转变成实数离散傅里叶逆变换的代数运算。

2.3 彩色图像的四元数奇异值分解及其性质

2.3.1 四元数奇异值分解理论 奇异值分解 SVD (Singular Value Decomposition)理论早在 20 世纪 70 年代首先提出, 奇异值良好的稳定性使得该理论在灰度图像处理中得到了广泛的应用。近年来, 将奇异值分解理论扩展到四元数领域得到的四元数奇异值分解 QSVD(Quaternion SVD)理论使得原本只适用于灰度图像的奇异值分解技术可以推广到彩色图像中。

然而, 由于四元数乘法的不可交换性, 四元数矩阵的奇异值分解与实数矩阵不太一样, 文献[10]对四元数奇异值分解进行了实践探索, 它认为对于任何  $n \times n$  阶四元数矩阵  $Q^q$ , 若矩阵的秩  $\text{rank}(Q) = r$ , 则存在四元数酉矩阵  $U^q$  和  $V^q$ , 使得  $Q^q = U^q \Sigma (V^q)^H$ , 其中  $U^q (U^q)^H = V^q (V^q)^H = I$ ,  $U^q$  和  $V^q$  的列向量分别被称为  $Q^q$  的左右特征向量, 而

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \sigma_1 & & & & & \\ & \dots & & & & \\ & & \sigma_r & & & \\ & & & 0 & & \\ & & & & \dots & \\ & & & & & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Sigma_r & \\ & 0 \end{bmatrix}$$

且满足  $\sigma_i \in R, |\sigma_1| \geq |\sigma_2| \geq \dots \geq |\sigma_r| > 0$ 。

2.3.2 四元数奇异值分解的性质 实系数矩阵奇异值分解理论在灰度图像处理领域通常表现出如下性质:

(1)矩阵与奇异值之间的多对一性质。一个矩阵的奇异值是确定的, 但不同矩阵可以有相同的奇异值。

(2)图像的几何和纹理信息都集中在奇异值分解得到的  $U, V$  矩阵中, 而奇异值矩阵  $S$  则表示图像的能量信息。

(3)对图像质量起主要影响作用的是  $U, V$  矩阵前若干列和对角阵  $S$  的前若干个元素。

(4)  $U, V$  矩阵前若干列以及奇异值矩阵  $S$  的前若干个元素具有较强稳定性, 对一些常见图像处理表现出一定鲁棒性。

(5)奇异值矩阵各元素间遵循从大到小降序排列的规律并且衰减很快。

在研究彩色图像四元数奇异值分解性质中, 我们还发现了几点没有经过公开讨论的性质, 列出于性质(6), 性质(7)。

(6)分解具有明显特征的矩阵时, 得到的  $U, V$  矩阵也具有特定特征。如图像经傅里叶时频变换后得到的频率矩阵, 低频部分位于四角, 高频部分位于中心, 对具有这样特征的矩阵进行奇异值分解, 得到的  $U, V$  矩阵也将具有一定规律: 即  $U, V$  矩阵的高能量区域集中在图像的主对角线和次对角线周边区域内, 而  $U, V$  矩阵的低能量区域集中在矩阵的第 1 行以及第 1 列(除去  $U(1,1), V(1,1)$ )。图 1 以 Cafet 图像为例, 显示了这条规律。

(7)对于彩色图像而言, 性质(2)不成立。

证明如下:

首先, 对于任意灰度图像  $G = U \begin{bmatrix} \Sigma_r & \\ & 0 \end{bmatrix} V'$ ,

若用 F 范数的平方来表示其能量, 则有

$$\begin{aligned} \|G\|_F^2 &= \text{tr}(G)\text{tr}(G') = \text{tr}(GG') \\ &= \text{tr} \left( U \begin{bmatrix} \Sigma_r & \\ & 0 \end{bmatrix} V' V \begin{bmatrix} \Sigma_r & \\ & 0 \end{bmatrix} U' \right) = \sum_{i=1}^r \sigma_i^2 \end{aligned} \quad (5)$$

式中  $\|G\|_F^2$  表示 F 范数的平方,  $\text{tr}(\cdot)$  表示求矩阵 F 范数,  $r$  表示矩阵的秩。此式表明, 灰度图像能量只和奇异值有关。

式(5)成立的前提为: 任意实数域矩阵  $A, B$ , 存在  $(AB)' = B'A'$ 。然而, 对于四元数域上的任意矩阵  $A^q$  和  $B^q$ , 等式  $(A^q B^q)' = B'^q A'^q$  不成立, 证明如下。

证明 设四元数矩阵  $A^q = (a_{ij})_{m \times p}$ ,  $B^q = (b_{ij})_{p \times n}$ , 则  $A^q B^q$  的第  $i$  行  $j$  列的元素为  $\sum_{k=1}^p a_{ik} b_{kj}$ ,

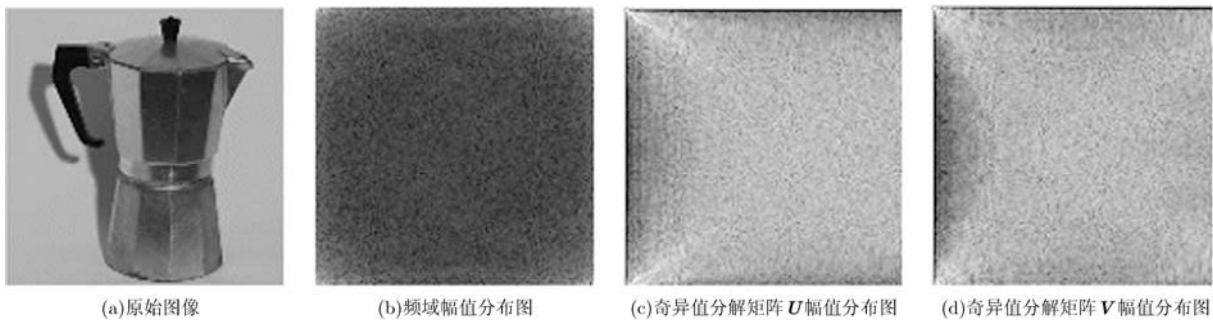


图 1 Cafet 图像的傅里叶域奇异值矩阵幅值特性图

$(A^q B^q)'$  第  $i$  行  $j$  列的元素为  $\sum_{k=1}^p a_{jk} b_{ki}$ 。若矩阵  $A^{q'} = (a'_{ij})_{p \times m}$ ,  $B^{q'} = (b'_{ij})_{n \times p}$ , 则  $a'_{ij} = a_{ji}$ ,  $b'_{ij} = b_{ji}$ , 矩阵  $B^{q'} A^{q'}$  第  $i$  行  $j$  列的元素为  $\sum_{k=1}^p b'_{ik} a'_{kj} = \sum_{k=1}^p b_{ki} a_{jk}$ 。由于四元数乘法不满足交换率, 即  $a_{jk} b_{ki} \neq b_{ki} a_{jk}$ , 故  $(A^q B^q)' \neq B^{q'} A^{q'}$ , 从而式(5)不成立。

这就说明彩色图像能量不仅只和奇异值有关, 还应当与四元数奇异值酉矩阵有关, 四元数矩阵奇异值分解得到的左右四元数酉矩阵应当比在各独立通道上进行实系数矩阵奇异值分解, 然后再将各通道分解得到的矩阵合成后得到的多重实系数矩阵包含的信息更为复杂。可以进一步推论, 如果仅改变彩色图像奇异值, 维持奇异值矩阵不变, 四元数方法得到的图像失真度应当小于多通道合成的方法。

**2.3.3 奇异值水印算法分析** 利用奇异值分解在图像中嵌入水印的策略是由 Liu 等人<sup>[1]</sup>较早提出, 算法利用奇异值良好的稳定性获得了抗攻击性能非常优秀的鲁棒水印图像。

然而通过 2.3.2 节对奇异值分解性质的分析不难发现, 上述一类算法在利用奇异值良好稳定性的同时也引入不少缺陷, 使算法安全性大大下降。

(1) 嵌入水印时, 没有考虑到矩阵与奇异值之间的多对一性质即不同图像的奇异值可能接近甚至相同的问题, 提取水印时又仅在奇异值中展开, 用到的信息并不能完全代表水印图像本身, 从而导致对随机选取图像的虚警率比较高;

(2) 伪造水印图像方便, 安全性差。由于图像信息主要集中在奇异值  $U$ ,  $V$  矩阵和最大奇异值  $S_1$  中, 且奇异值衰减很快, 不同图像的奇异值除前若干个外均比较接近, 导致只要能够获得任意含水印图像作品, 就可以方便地将任意选取的图像伪造成满足一定不可见性和鲁棒性的水印图像;

(3) 嵌入水印时, 人为改变奇异值大小不会改变重构再分解后奇异值间的降序排列顺序, 这样, 在检测水印时就需要原始图像的参与, 不能做到盲检测。

文献[12], 文献[13]对缺陷(1), 缺陷(2)进行了比较详细的实验讨论, 然而, 他们并没有给出很好的解决方案, 此后很多学者在文献[11]研究基础上提出了自己的基于奇异值分解的水印算法<sup>[14]</sup>, 侧重点还是在不可见性基础上追求更高的鲁棒性, 上述问题并没有得到很好的重视和解决。

### 3 彩色图像四元数频域奇异值分解水印算法

众多奇异值分解水印算法存在的安全问题归根到底还是因为算法仅用到了水印图像的奇异值信息

而没有考虑对图像影响占重要地位的  $U$ ,  $V$  矩阵, 本文以此为切入点, 构造一个与原始彩色图像 QSVD 分解得到四元数矩阵  $U$ ,  $V$  有关的向量作为水印序列, 在保证不可见性和鲁棒性折中的前提下, 有效地提高算法的安全性。

#### 3.1 水印的嵌入

为了方便起见, 我们假设原始载体图像矩阵为方阵, 对于长宽不等的非正方形图像, 本文算法同样适用。

(1) 将大小为  $M \times M$  的原始载体彩色图像按一定大小  $n$  分块(为方便起见,  $n$  一般取为  $M$  的因子), 取得无重叠的  $N=(M/n)^2$  个小块;

(2) 对每个小块进行四元数傅里叶变换后接着进行四元数奇异值分解, 得到每个小块的左右四元数酉矩阵  $U_i^q$ ,  $V_i^q$  和奇异值对角阵  $S_i$ ,  $1 \leq i \leq N$ ;

(3) 使用公式  $W_{ij} = UV_{ij}^q \cdot \delta_{ij}$ ,  $1 \leq j \leq k$  构造与四元数矩阵  $U_i^q$ ,  $V_i^q$  相关的水印序列  $W_{ij}$ 。依据 2.3.2 节 SVD 性质(6), 取出四元数矩阵  $U_i^q$ ,  $V_i^q$  前  $X$  列(称为主成分列)中的  $U_i^q(1,1), U_i^q(2,2), U_i^q(n-1,2), \dots, U_i^q(x,x), U_i^q(n-x+1,x)$ , 以及  $V_i^q(1,1), V_i^q(2,2), V_i^q(n-1,2), \dots, V_i^q(x,x), V_i^q(n-x+1,x)$  顺序排列组成式中的  $UV_{ij}^q$ , 以保证选出来的元素是  $U_i^q$ ,  $V_i^q$  矩阵前  $X$  列中能量最大的元素, 算法鲁棒性达到最高; 构造公式中的扰动量  $\delta_{ij}$  取为当前奇异值  $S_{ij}$  与其相邻的较大奇异值  $S_{i(j-1)}$  和较小奇异值  $S_{i(j+1)}$  差值的较小值, 即  $\delta_{ij} = \min(S_{i(j-1)} - S_{ij}, S_{ij} - S_{i(j+1)})$  以保证改动后的奇异值继续保持原来的排列顺序, 避免检测时奇异值的顺序发生自适应调整。将所有分块产生的  $W_{ij}$  顺序连接起来得到长度为  $N \times k$  的水印序列  $W$ ;

(4) 取出该块中介于最大和最小位置之间连续  $k$  个奇异值作为嵌入位置以取得不可见性和鲁棒性的折中;

(5) 采用如下方法嵌入水印:  $S_{W_{ij}} = S_{ij} + \gamma \cdot W_{ij}$ ,  $0 < \gamma < 1$  为全局能量调节系数, 用于调整嵌入能量, 确保水印嵌入后达到临界不可见状态;

(6) 重复步骤(3)-步骤(5)修改完所有的分块, 对修改后的分块进行四元数傅里叶反变换, 将所有分块合成后得到水印图像。

#### 3.2 水印的检测

在这个步骤中, 不需要原始载体图像参与, 可以视为一种盲检测方法。需要提供原始图像分块奇异值对角阵  $S_i$ ,  $1 \leq i \leq N$  作为密钥, 步骤如下:

(1) 对待检测图像按嵌入水印时的同样大小分块;

(2)依次取出每一个分块,对其四元数傅里叶变换后接着进行四元数奇异值分解;

(3)按照嵌入时的位置选出分解得到的四元数矩阵  $U_i^{q'}$ ,  $V_i^{q'}$  前  $X$  列的  $k$  个元素,排成一个向量  $UV_i^{q'}$ ,并计算由此向量产生的水印  $W_{ij}^{UV} = UV_i^{q'} \cdot \delta_{ij}, 1 \leq j \leq k$ , 式中扰动量  $\delta_{ij}$  的计算方法与嵌入时相同。对每个分块都采用同样方法,将所有分块产生的  $W_i^{UV}$  顺序连接起来得到与待检测水印图像相关的水印序列  $W^{UV}$ ;

(4)按照嵌入时的位置取出该分块分解得到的  $k$  个奇异值  $S_{ij}'$ ,提取密钥  $S_i$  中相应位置奇异值  $S_{ij}$ ,计算嵌入的水印  $W_{ij}' = S_{ij}' - S_{ij}$ 。对所有分块都进行同样的操作,将  $N$  个  $W_i'$  顺序连接起来,得到实际嵌入的水印序列  $W'$ ;

(5)计算  $W^{UV}$  和  $W'$  两者的归一化相关系数 Corr;

(6)设置适当阈值  $T$ ,当  $\text{Corr} > T$  时判定为存在水印,否则判定为没有水印。

## 4 实验结果与分析

在仿真实验中,首先选取  $512 \times 512$  大小的 Avion, Lena 和 House 3 幅彩色载体图像来测试算法的不可见性和鲁棒性。嵌入水印时使用到的参数如下:图像分块大小  $16 \times 16$ ,共取得  $N=(512/16)^2=1024$  个小块,每块取其中的第 2-第 7 个奇异值作为嵌入位置,即  $k=6, 2 \leq j \leq 7$ ,主成份列  $X=2$ ,全局能量调节系数  $\gamma$  取 0.8,下面给出实验结果和分析。

### 4.1 不可见性

我们在 2.3.2 节 QSVD 分解性质(7)中表明,对于彩色图像水印,维持奇异值矩阵不变,仅改变图像奇异值大小,四元数方法得到的图像失真度应当小于多通道合成的方法。图 2 中实验数据很好地说明了这一观点,图中独立多通道方法指的是和本文算法具有相同嵌入步骤、嵌入容量,但使用独立多通道来实现水印嵌入,最后将各通道结果合成的方法,图中所列数字为传统衡量图像质量用到的 PSNR 值。

观察两种方法获得的水印图像,在使用相同的全局能量调节系数调节的情况下,都能满足不可见性并且人眼视觉效果没有太大差别。但是比较二者 PSNR 值,四元数方法高于多通道合成方法,说明了本文方法获得的水印图像的失真度确实比后一种方法要小。

### 4.2 鲁棒性

一个好的水印算法在满足不可见性的同时,还必须满足一定的鲁棒性。表 1 给出了算法对几种

表 1 攻击-检测相关系数表

检测相关系数	Avion	Lena	House
均值滤波 $3 \times 3$	0.7878	0.7356	0.7617
高斯滤波 $3 \times 3$ 方差=1	0.8053	0.8427	0.8359
高斯白噪声, 方差=0.01	0.8185	0.8170	0.8333
椒盐噪声 0.01	0.7347	0.7462	0.7834
$7 \times 7$ 马赛克攻击	-0.8316	-0.7571	-0.7102
中央剪切填充 1/4 黑色像素	-0.1700	-0.1366	-0.1346
逆时针旋转 $45^\circ$	-0.2276	-0.3426	-0.3269

常见无意攻击的检测相关系数。

可以看出,由于奇异值和奇异值酉矩阵的稳定性,算法对一些常见非同步无意攻击的检测相关系数数值是较高的,但对剪切和旋转等攻击的鲁棒性较差,这主要是因为类似的几何攻击中,用于产生水印的  $U, V$  矩阵发生了比较大的变化。

### 4.3 误检率







最后比较本文算法与文献[11](这里我们将文献[11]的方法扩展到四元数域进行)以及文献[6-8]算法的误检测率。实验过程如下:首先,选择图像数据库中任意一幅彩色图像,分别使用本文算法和上述 4 种算法嵌入水印,然后在图像数据库中任意选择若干幅大小相同,类型不同的无水印彩色图像,使用上述几种算法的提取水印过程依次对这些图像进行提取水印操作,最后比较提取出的信息和嵌入水印之间的归一化相关系数。为了保证嵌入能量相当,我们合理调整了算法中的嵌入强度系数,使得几种方法得到的水印图像的 PSNR 值大致相当。以 Avion 彩色图像为例,实验结果如下:

观察表 2 中的数据,在我们的算法中,提取的水印  $W'$  是由  $N$  个  $W_i' = S_i' - S_i$  顺序组合得到的( $W_i'$  是由对角阵  $S_i'$  和  $S_i$  对角线元素对应相减得到),对不含水印的原始载体图像,  $W_i' = S_i' - S_i = 0$ ,从而提取的水印  $W'$  为零,归一化相关系数也必为零,即对无水印的原始图像,使用本算法完全提取不出水印;使用文献[11]算法,从无水印图像中提取出的信息和嵌入的水印之间的相关系数达到 0.9855,与提取含水印图像的效果几乎没有差别。对从其他 5 幅随机选取的无水印图像中提取的信息进行检测时,使用我们的方法,由于  $W_i^{UV} = UV_i^{q'} \cdot \delta_{ij}$  中的  $UV_i^{q'}$  来自于待检测的图像  $U', V'$  矩阵的前若干列,根据 2.3.2 节中性质(3):对图像影响占主导地位的是图像奇异值分解得到的  $U, V$  矩阵的前若干列,不同待检测图像的  $UV_i^{q'}$  之间必然差别很大,导致  $W_i^{UV}$  差别很大,从而  $W^{UV}$  和  $W'$  两者的相关度 Corr 趋向于零,实验结



图2 水印图像不可见性对比结果

表2 Avion水印图像的检测相关系数

无水印随机图像						
本文算法 (PSNR=37.5983)	0	-0.3413	-0.3444	-0.2137	-0.0793	-0.0596
文献[12]算法 (PSNR=37.5343)	0.9855	0.8406	0.9725	0.9788	0.9057	0.9847
文献[6]算法 (PSNR=37.1849)	0.7378	0.5107	0.4223	0.3881	0.2003	0.2884
文献[7]算法 (PSNR=37.9356)	0.6897	0.5059	0.4563	0.4025	0.2418	0.2076
文献[8]算法 (PSNR=37.8561)	0.6990	0.5234	0.4087	0.4296	0.2124	0.3112

果,对5幅图像检测得到相关系数均低于0.35,可以认为提取的内容和嵌入的内容基本无关,误检率为零,而文献[11]算法得到相关系数均大于0.9,提取

的内容和嵌入的内容相关度极高,基本可以认定原水印的存在,误检率达到100%,使用文献[6],文献[7]和文献[8]3种算法得到的相关系数值保持在0.2~

0.5之间,提取的内容和嵌入的内容保持着一定相关度,对随机选取的图像仍然存在较大误检率。由此可见本文算法确实大大降低了对随机选取图像的误检测率,提高了算法的安全性。

## 5 结论

由于缺少彩色像素的整体处理方式,对彩色图像水印的研究一直以来遵循灰度图像处理方式,没能很好地利用彩色图像全部信息。而已有为数不多的四元数水印算法在设计上,过于强调鲁棒性,缺少对不可见性、安全性的细致考虑,造成误检率高以及水印图像易于伪造等现象。本文提出一种结合四元数变换域和分解方法的安全水印方法,主要研究工作包括:(1)首次提出并通过理论以及实验数据证明对于彩色图像水印,使用相同处理步骤嵌入相同容量的水印信号,四元数方法得到的水印图像失真度要小于彩色图像水印传统方案中使用的多通道方法;(2)本文提出的四元数变换域结合奇异值分解的方法水印方案获得了比一般变换域算法更好的安全性。算法首先采用四元数模型来表示彩色图像像素,由于四元数傅里叶变换问题的解决,设计时将所有处理放在频域进行,使得算法具有一切频域水印算法的优点。接着通过构造一个与原始图像 QSVD 分解得到四元数矩阵  $U$ ,  $V$  有关的向量来作为水印序列,在检测时将提取的水印和由水印图像 QSVD 分解的四元数奇异值矩阵  $U'$ ,  $V'$  构成的水印序列进行相关计算,从而判定水印的归属,在增加水印与图像相关程度的同时大大降低了对随机选取图像的虚警率,并且使得伪造水印图像难以进行;(3)由于数字图像的奇异值矩阵  $S$  和奇异值酉矩阵  $U$ ,  $V$  对常见处理表现出优秀的稳定性,算法在检测时用水印图像 QSVD 分解的矩阵  $U'$ ,  $V'$  来替代原始图像的  $U$ ,  $V$  矩阵,从而实现了盲检测。实验验证,本文算法确实在表现彩色像素、获得失真更小的水印图像方面优于传统方法,在虚警率方面优于已有的四元数水印算法。基于四元数理论的彩色图像处理技术在国内的研究尚处于起步阶段,本文的工作对四元数在彩色图像处理中的应用是很好的补充,为彩色图像的版权保护提供了一种新方法。

## 参 考 文 献

- [1] Hussein J A. Spatial domain watermarking scheme for colored images based on log-average luminance[J]. *Journal of Computing*, 2010, 2(1): 100-103.
- [2] Findik O, Babaoğlu I, and Ülker E. A color image watermarking scheme based on artificial immune recognition system[J]. *Expert Systems with Applications*, 2011, 38(3): 1942-1946.
- [3] Gakkhar D, Samant S, Sharma V, et al. Compression resistant multichannel color image watermarking[C]. International Conference on Signal and Image Processing, Shanghai, China, 2010: 23-28.
- [4] Sangwine S J. Fourier transforms of colour images using quaternion, or hypercomplex, numbers[J]. *Electronic Letter*, 1996, 32(21): 1979-1980.
- [5] Patrick B, Nicolas L B, and Chassery J M. Color image watermarking using quaternion Fourier transform[C]. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Hong Kong, China, 2003: 521-524.
- [6] Tsui T K, Zhang X P, and Androutsos D. Color image watermarking using multidimensional Fourier transforms[J]. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2008, 3(1): 16-28.
- [7] 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, 31(9): 2242-2248.  
Jiang S H, Zhang J Q, and Hu B. Content based image watermarking algorithm in hypercomplex frequency domain[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2009, 31(9): 2242-2248.
- [8] 孙菁, 杨静宇, 傅德胜. 彩色图像四元数频域幅值调制水印算法[J]. 计算机科学, 2011, 38(3): 123-126, 139.  
Sun J, Yang J Y, and Fu D S. Watermarking algorithm for color images based on quaternion frequency modulation[J]. *Computer Science*, 2011, 38(3): 123-126, 139.
- [9] Sangwine S J and Ell T A. Hypercomplex Fourier transforms of color images[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2007, 16(1): 22-35.
- [10] Nicolas L B and Jerome M. Singular value decomposition of quaternion matrices: a new tool for vector-sensor signal processing[J]. *Signal Processing*, 2004, 84(7): 1177-1182.
- [11] Liu R Z and Tan T N. An SVD-based watermarking scheme for protecting rightful ownership[J]. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2002, 4(1): 121-128.
- [12] Zhang X P and Li K. Comments on "an SVD-based watermarking scheme for protecting rightful ownership"[J]. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2005, 7(2): 593-594.
- [13] Rykaczewski R. Comments on "an SVD-based watermarking scheme for protecting rightful ownership"[J]. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2007, 9(3): 421-423.
- [14] Lai C C and Tsai C C. Digital image watermarking using discrete wavelet transform and singular value decomposition [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2010, 59(11): 3060-3063.

孙 菁: 女, 1978 年生, 博士生, 讲师, 研究方向为数字水印技术、密码学及信息安全技术。

杨静宇: 男, 教授, 1941 年生, 博士生导师, 研究方向为模式识别与机器学习。