

彩色图像四元数频域幅值调制水印算法

孙菁^{1,2} 杨静宇¹ 傅德胜²

(南京理工大学计算机科学与技术学院 南京 210094)¹

(南京信息工程大学计算机与软件学院 南京 210044)²

摘要 彩色图像处理常用的独立单通道方式在处理过程中不能体现各彩色通道间的光谱联系。针对彩色载体图像,提出了一种彩色图像四元数频域幅值调制水印算法。首先在空域中计算四元数表示的载体图像块不均匀度大小,从而对载体图像的单位小块进行自适应选取;接着对彩色载体图像进行四元数傅立叶变换,得到其频域矩阵;然后计算分块傅立叶直流位置上的四元数模值,将水印嵌入在模值中。仿真实验结果表明,该方法可以把水印带来的误差扩散到图像的红、绿、蓝3色的各个分量上,且对常见攻击具有较好的鲁棒性,实现了数字水印不可见性和鲁棒性的良好结合。

关键词 数字水印,四元数,四元数傅立叶变换

中图法分类号 TP309 **文献标识码** A

Watermarking Algorithm for Color Images Based on Quaternion Frequency Modulation

SUN Jing^{1,2} YANG Jing-yu¹ FU De-sheng²

(College of Computer Science and Technology, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)¹

(College of Computer & Software, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)²

Abstract Separate channel techniques performed on color images have the disadvantage of less ability to show connection between each channel during image processing. A new method to process color images with quaternion Fourier transform was put forward in this paper. Firstly, ununiformity of each unit quaternion block in host image was calculated to pick up the potential block adaptively. Secondly, frequency matrix of host color image was obtained by using quaternion Fourier transforms. After that, the water marks were embedded into the amplitude of AC coefficient. Experimental results show that the image distortions from the watermark are spread into the three channels of a color host image and the proposed watermarking algorithm realizes a better trade off between imperceptibility and robustness.

Keywords Digital watermarking, Quaternion, Quaternion Fourier transforms

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,以静止图像为载体的数字水印算法大多都是针对灰度图像的。现有的彩色图像水印处理方法单一,归纳起来大致可以分为两类:①单通道处理。通过提取载体图像的某一颜色分量信息(由于人类视觉系统对蓝色分量变化不敏感的特性,此颜色分量通常是蓝色)^[1]或对彩色图像进行颜色模型转换,使用彩色图像的单个通道(如亮度)信息^[2]来进行水印的嵌入。这一类算法本质上沿用了传统灰度图像方法来处理彩色图像,没有充分利用彩色图像信息,可嵌入的信息量较少,算法鲁棒性较差;②多通道合成^[3]。在这类方法中,无论采用空域算法还是频域算法,都是将彩色图像视为多通道图像的合成,最终水印的嵌入是对多个通道分量处理结果的求和。算法的优点在于对整幅图像进行水印嵌入,鲁棒性高于前一类,但是多通道计算量大,且所做的处理仍然是在单个通道独立进行,无法表现彩色图像各通道间的相互关系,本质上仍然是灰度图像处理

方法的扩展。

由于彩色图像的3个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进行处理,那么彩色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。英国学者 Todd 和 Sangwine 首先将四元数概念引入彩色图像处理中。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。该数学模型已逐渐应用到彩色图像压缩和编码^[4]、彩色边缘检测^[5]、彩色图像分割^[6]、彩色图像的相关性测量^[7]、彩色图像增强和去噪^[8]等多个领域。本文提出一种彩色图像四元数频域幅值调制水印算法。首先在空域中计算四元数表示的载体图像块不均匀度大小,从而对载体图像的单位小块进行自适应选取。接着对彩色载体图像进行四元数傅立叶变换(QFT, Quaternion Fourier Transform),得到其频域矩阵。然后计算分块傅立叶直流位置上的四元数模值,将水印嵌入在模值中。算法始终将彩色像素作为一个整体来进行处理,彩色通道间的光谱联系贯穿在对这个整体进行傅立叶变换以及幅值水印嵌入的过程中,在具有

良好的不易感知性的同时,也保证了较好的抗攻击能力。仿真实验表明,本文提出的算法将嵌入水印带来的误差扩散到了空域彩色载体图像的红、绿、蓝每种颜色,在具有良好的不可感知性的同时,对添加噪声以及空域滤波等攻击行为表现出了较好的鲁棒性。目前,基于四元数理论的彩色图像水印技术的研究尚处于起步阶段,其在彩色图像各领域中的应用潜力很大。

2 彩色图像的四元数描述及四元数傅立叶变换

2.1 彩色图像的四元数描述

四元数是复数在抽象代数中的引申,以高维度呈现。早在 1843 年英国数学家 Hamilton 就提出了四元数理论,但是直到 20 世纪 90 年代四元数的理论和方法才开始应用到彩色图像处理中。一个四元数可以表示为:

$$q = a_0 + a_1 i + a_2 j + a_3 k \quad (1)$$

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:

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

与传统复数相似,一个四元数由一个实部(如定义中的 a_0)和一个包含 3 个分量的虚部组成。通常把含 3 个分量的四元数的虚部看成一个矢量 $V(q) = a_1 i + a_2 j + a_3 k$,把四元数的实部看作一个标量 $S(q) = a_0$,因此四元数可以表示为标量加矢量的和的形式 $q = S(q) + V(q)$ 。标量部分 $S(q) = 0$ 的四元数被称为纯虚四元数。

仿照复数的定义,四元数三角形式的定义为:

$$q = |m|(\cos\Phi + \mu\sin\Phi)$$

式中, $|m| = \sqrt{a_0^2 + a_1^2 + a_2^2 + a_3^2}$ 称为四元数的模, μ 和 Φ 分别称为四元数的特征轴和特征角。 $\mu = \frac{1}{|m|}(a_1 i + a_2 j + a_3 k)$, $\mu^2 = -1$,是一个单位纯虚四元数,表示一个由 μ 所确定的三维空间。 Φ 的含义与复数相位角的含义类似,表示四元数标量部分 $S(q)$ 和矢量部分 $V(q)$ 生成的角, $\Phi \in [0, \pi]^{[9]}$ 。特别是,当四元数标量部分 $S(q) = 0$ 时, $\Phi = \frac{\pi}{2}$ 。

对于大小为 $M \times N$ 的彩色图像 $f(x, y)$, x 和 y 分别表示像素所在矩阵的行和列的位置, $x \in [0, M-1]$, $y \in [0, N-1]$,令四元数的 3 个虚部分别代表 R, G, B 3 个基色分量,实部为 0,则彩色图像 $f(x, y)$ 的红绿蓝(RGB)模型可表示为如下的纯虚四元数。

几何形式:

$$f^u(x, y) = R(x, y)i + G(x, y)j + B(x, y)k \quad (3)$$

三角形式:

$$f^u(x, y) = |m|\mu \quad (4)$$

式中, $|m| = \sqrt{R^2 + G^2 + B^2}$,表示四元数的模, $\mu = \frac{1}{|m|}(Ri + Gj + Bk)$,是一个单位纯虚四元数。

2.2 四元数傅立叶变换

由式(2)可以看出,四元数的乘法不满足交换律。因此,图像处理中常用的离散傅立叶变换的四元数有 3 种定义形式。

双边变换:

$$QFT_{fLR}^u(u, v) = S \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} e^{-\mu_1 2\pi(\frac{xu}{M} + \frac{yv}{N})} f^u(x, y) \cdot e^{-\mu_2 2\pi(\frac{xu}{M} + \frac{yv}{N})} \quad (5)$$

左变换:

$$QFT_{fL}^u(u, v) = S \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} e^{-\mu_1 2\pi(\frac{xu}{M} + \frac{yv}{N})} f^u(x, y) \quad (6)$$

右变换:

$$QFT_{fR}^u(u, v) = S \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f^u(x, y) e^{-\mu_1 2\pi(\frac{xu}{M} + \frac{yv}{N})} \quad (7)$$

上述公式中的 $S = \frac{1}{\sqrt{MN}}$, $f^u(x, y)$ 为 2D 彩色图像的四元数表示, $QFT_f^u(u, v)$ 为该彩色图像的傅氏频谱的四元数表示, (x, y) 和 (u, v) 分别为它们在时域和频域中的坐标。双边四元数傅立叶变换中需要两个独立的 μ ,且计算量明显大于单边 QFT,现在还没有数据表明这两类变换的优劣,因此本文算法采用单边变换中的左变换来实现。

即使是单边左傅立叶变换也由于四元数乘法不满足交换律而使得四元数傅立叶变换与普通实数傅立叶变换有着很大的区别。在处理四元数的傅立叶变换时, Todd 和 Sangwine 给出了较好的方法,他们提出一种“平行(simplex)垂直(perplex)分解”变换法^[10]。首先选择一个任意单位纯虚四元数 μ ,将待变换的四元数分解成平行于 $8 \times 8\mu$ 和垂直于 μ 的两个二次复数后,对此二次复数进行两次复数傅立叶变换,从而求解出四元数的傅立叶变换。

对于四元数傅立叶变换来说, μ 的选取非常关键,选取不同的 μ 对应着将彩色图像进行不同方向的分解, Bas 进行了一系列水印嵌入实验,认为选取 $\mu = (-2j + 8k) / \sqrt{68}$ 进行四元数傅氏变化后,将水印嵌入在与 μ 平行的分量中^[11],获得的视觉影响最小。但此方法经鲁棒测试,性能较差。更为一般的情况,可以取强度矢量 $\mu = (i + j + k) / \sqrt{3}$ 。

具体四元数的傅氏变换步骤如下:
(1) 将彩色图像 $f(x, y)$ 表示成为如式(3)所示的四元数模式。

(2) 取 3 个正交的单位虚向量 μ_1, μ_2, μ_3 ,通常选 $\mu_1 = (i + j + k) / \sqrt{3}$,经计算 $\mu_2 = (j - k) / \sqrt{2}$, $\mu_3 = (j + k) / 6^{[12]}$,对 $f(x, y)$ 进行坐标变换 $f(x, y) = a + b\mu_1 + c\mu_2 + d\mu_3$ 。令 $\mu_3 = \mu_1\mu_2$,则

$$f(x, y) = (a + b\mu_1) + (c + d\mu_1)\mu_2 = A + B\mu_2 \quad (8)$$

式中, $A = a + b\mu_1$, $a = 0$ 是一个实部为 0 的纯虚四元数, $B = c + d\mu_1$ 是一个实部不为 0 的二次复数。这样, $f(x, y)$ 就被分解成为与 μ_1 轴平行的分量 A ,代表该彩色图像的亮度(luminance);与 μ_1 轴垂直的分量 $B\mu_2$,代表该彩色图像的色彩度(chrominance)。

(3) 将上述四元数分解结果代入式(5),进行四元数傅立叶左变换:

$$\begin{aligned} QFT_f^u(u, v) &= S \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} e^{-\mu_2 2\pi(\frac{xu}{M} + \frac{yv}{N})} (A + B\mu_2) \\ &= A_{CFT} + B_{CFT}\mu_2 \\ &= \text{real}(A_{DFT}) + \text{imag}(A_{DFT})\mu_1 + (\text{real}(B_{DFT}) + \\ &\quad \text{imag}(B_{DFT})\mu_1)\mu_2 \end{aligned} \quad (9)$$

式中, CFT 表示普通复数的 Fourier 变换, DFT 表示实数离散 Fourier 变换, real, imag 分别代表取复数的实部和虚部。经过这样的变换,四元数傅立叶变换就转变成图像处理中常见的实数离散傅立叶变换的代数运算。可以看出,四元数傅立叶变换的结果仍然是四元数,并且实部一般不为 0。

计算四元数傅立叶逆变换需要按同样的原理,先将四元数函数 $QFT_f^u(u, v)$ 沿 μ_1, μ_2, μ_3 分解成为两个二次复数:平行

分量 A' 和垂直分量 $B'\mu_2$, 即 $QFT_f^q(u, v) = A' + B'\mu_2$, 则逆变换:

$$\begin{aligned} IQFT_f^q(x, y) &= S \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} e^{j2\pi(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N})} (A' + B'\mu_2) \\ &= A'_{KFT} + B'_{KFT}\mu_2 \\ &= \text{real}(A'_{IDFT}) + \text{imag}(A'_{IDFT})\mu_1 + (\text{real}(B'_{IDFT}) + \text{imag}(B'_{IDFT})\mu_1)\mu_2 \end{aligned} \quad (10)$$

式中, IDFT 表示普通实数 Fourier 逆变换, real, imag 分别代表取复数的实部和虚部。四元数傅立叶逆变换问题也转变成实数离散傅立叶逆变换的代数运算, 经过四元数傅立叶逆变换图像又变换到了空域中。设式(9)、式(10)计算结果四元数的几何表示分别为

$$A_0 + A_1i + A_2j + A_3k \quad (11)$$

$$A_0' + A_1'i + A_2'j + A_3'k \quad (12)$$

在图像没有受到篡改的情况下, A_0' 将为零。由式(3)可以得出, 在彩色图像的四元数模型中, 实部并不起任何作用, 即 A_0' 是否为零不会影响到图像的显示, 所以在四元数傅立叶逆变换中可以不考虑 A_0' 对图像的影响。

将 μ_1, μ_2, μ_3 的值代入式(10), 可得:

$$\begin{aligned} A_1' &= \text{imag}(A_{0IDFT})/\sqrt{3} + \text{real}(A_{1IDFT}) + \text{imag}(A_{2IDFT})/\sqrt{3} - \text{imag}(A_{3IDFT})/\sqrt{3} \\ A_2' &= \text{imag}(A_{0IDFT})/\sqrt{3} - \text{imag}(A_{1IDFT})/\sqrt{3} + \text{real}(A_{2IDFT}) + \text{imag}(A_{3IDFT})/\sqrt{3} \\ A_3' &= \text{imag}(A_{0IDFT})/\sqrt{3} + \text{imag}(A_{1IDFT})/\sqrt{3} - \text{imag}(A_{2IDFT})/\sqrt{3} + \text{real}(A_{3IDFT}) \end{aligned} \quad (13)$$

3 基于视觉容量的自适应四元数子块选择

水印嵌入可以视为在原始载体图像中叠加上一个弱信号。如果叠加的水印幅度低于某一门限, 人眼视觉系统(HVS)就无法感觉到水印的存在。该门限值随图像区域的不同而不同, 一般来说, 背景变化越大, 纹理越复杂, 门限值就越高, 这种现象称为视觉掩蔽。根据视觉掩蔽特性规律, 图像具有不同局部性质的区域, 具有不同的视觉门限, 可允许添加的水印幅度不同。因此, 可通过图像局部性质的不同, 自适应地选择视觉容量大的区域来嵌入水印。

为了在载体图像中选取视觉容量大的图像子区域, 采用空域图像处理办法, 依据下式的块不均匀度 d 的大小对载体图像的单位小块进行自适应选取:

$$d(Q_k) = \frac{1}{n^2} \cdot \sum_{(i,j) \in Q_k} \frac{|\text{abs}(f(i,j) - m_k)|}{|\text{abs}(m_k^{1+\lambda})|} \quad (14)$$

$k=1, 2, \dots, M \times M / n \times n$

式中, 为方便起见, 设载体图像为方阵, 大小为 $M \times M, n \times n$ 为子块划分单位, Q_k 表示载体图像某个单位子块, m_k 为该子块的均值, λ 为加权修正因子(0.6~0.7)。与灰度图像不同的是, 载体图像为四元数表示的彩色图像, 因此, 式(14)分子、分母括号中的参数均为四元数, abs 表示取参数四元数的模。

计算出的块不均匀度 d 值越大, 意味着该子块均匀性越差, 纹理信息就相对丰富, 视觉容量就大。

4 四元数模调制

彩色图像的频域系数仍是四元数, 则该四元数还可以表示成为以下形式:

$$QFT_f^q = |m|(\cos\Phi + \mu\sin\Phi) \quad (15)$$

或

$$\begin{aligned} QFT_f^q &= A_0 + A_1i + A_2j + A_3k \\ &= |m|(\frac{A_0}{|m|} + \frac{A_1}{|m|}i + \frac{A_2}{|m|}j + \frac{A_3}{|m|}k) \end{aligned} \quad (16)$$

式中, $|m| = \sqrt{A_0^2 + A_1^2 + A_2^2 + A_3^2}$, 为四元数的模, 即傅立叶系数的幅值, 表明了各正弦分量的大小; μ 和 Φ 如本文第1节所述, 分别为单位纯虚四元数以及四元数的特征角, 特征角信息 Φ 表明了各正弦分量在图像中出现的位置, 决定了图像信息发生的位置, 在图像处理中对图像的视觉影响更大。因此, 将水印信息隐藏在四元数傅立叶变换后的幅值中, 经过四元数傅立叶反变换后, 对图像造成的视觉失真影响将大大小于隐藏在相位信息中。基于这个原理, 本文提出一种彩色图像四元数频域模调制水印算法, 将水印信息隐藏在经视觉容量计算选择出的四元数子块的傅立叶变换直流系数模值中。直流系数具体指的是如图1(b)阴影部分所示位置。

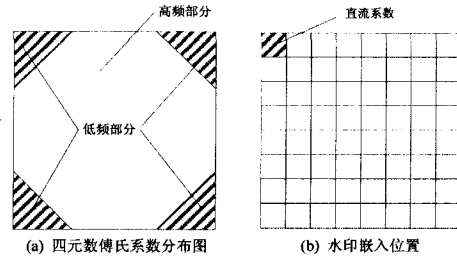


图1 水印的嵌入位置示意

傅立叶系数幅值变化会给傅立叶逆变换后的空域图像带来一定的误差。若傅立叶系数幅值变化了 σ , 引入此变化量后, 式(16)将变成:

$$QFT_f^q(\sigma) = (|m| + \sigma)(\frac{A_0}{|m|} + \frac{A_1}{|m|}i + \frac{A_2}{|m|}j + \frac{A_3}{|m|}k) \quad (17)$$

结合式(13)和式(17)可以看出误差 σ 扩散到了空域图像 A_1', A_2', A_3' 3个虚部, 即彩色载体图像的红、绿、蓝每种颜色。这样, 误差带来的变化更不易被察觉, 在提高了数字水印算法的不易感知性的同时, 也提高了水印的抗攻击能力。

5 四元数频域模调制水印

5.1 水印的嵌入

四元数频域模调制水印算法具体步骤如下:

(1) 子块选择。根据第3节中的方法, 计算载体图像 Q 每个 8×8 单位子块的不均匀度 d , 按 d 的大小降序排列每个子块, 选择前 N (N 为水印长度) 个块为待嵌入位置。

(2) 彩色图像分块四元数傅立叶变换。选取 $\mu = (i + j + k)/\sqrt{3}$, 对载体图像 Q 选出位置上的单位小块使用式(8)平行垂直分解法得到载体图像单位小块的两个复数分量, 然后对每个单位小块使用式(9)进行传统复数傅立叶变换, 得到彩色图像的四元数频率矩阵。

(3) 水印嵌入。对选出的 8×8 四元数频率矩阵, 按图1(b)所示, 计算其直流系数位置上的四元数模, 设为 m_i , 嵌入后对应位置上的模值 $m_i w_i = m_i + \epsilon W_i$, 其中 ϵ 为水印嵌入强度, W_i 为二进制水印比特。 ϵ 越大, 则算法鲁棒性越好, 不可见性越差。

(4) 四元数傅立叶反变换及组合子块。对步骤(3)计算结果做四元数傅立叶逆变换, 得到包含水印的图像 Q' 。

5.2 水印的检测

水印的检测过程为嵌入过程的逆过程, 步骤如下:

(1) 子块选择。按照嵌入时子块选择方法定位出待测图像中子块的位置。

(2) 分块四元数傅氏变换。对载体图像和嵌入水印后的图像分别做分块四元数傅氏变换,得到频域四元数矩阵,分别记为 $F_{8 \times 8}$, $F'_{8 \times 8}$ 。

(3) 水印恢复。计算 $F_{8 \times 8}$ 和 $F'_{8 \times 8}$ 直流四元数模值,记为 m, m' , 计算 $W' = \text{round}(m' - m)$ 。若 $W' = 0$, 则水印序列 $W(i) = 0$, 否则 $W(i) = 1, i = 1, 2, \dots, N$ 。

6 实验结果与分析

为了测试本文数字图像水印算法的性能,我们对多种不同的彩色图像和图像类型做了测试。但限于篇幅,本节只给出在 512 行 $\times$ 512 列标准彩色 BMP 图像 Lena、PPM 图像 Baboon 以及 PBM 图像 Avion 上所做的测试数据。数字水印 W 选用长为 1024bit 均匀分布二值伪随机数。经多次实验,取水印嵌入强度 $\epsilon = 3$, 此时嵌入水印后的图像达到临界可察觉状态,算法取得最优鲁棒性。

6.1 不可见性

图 2—图 4 分别显示了 Lena、Baboon 和 Avion 原始图像、含水印图像以及原始图像与嵌入水印后图像的差值图像。图 3 中(a)为原始载体图像。图 3(b)为使用本文算法嵌入水印后的图像,可以看到,嵌入水印后的图像降质人眼无法察觉,验证了算法的不可见性。图 3(c)为嵌入水印前后的差值图,经过 5000 倍放大后差别显而易见。并且可以看出,嵌入水印后的误差扩散到了图像的红、绿、蓝 3 色的各个分量上,且水印信息的确是隐藏在图像载体纹理丰富的区域。



图 2 Lena BMP 图像水印嵌入效果和差值图

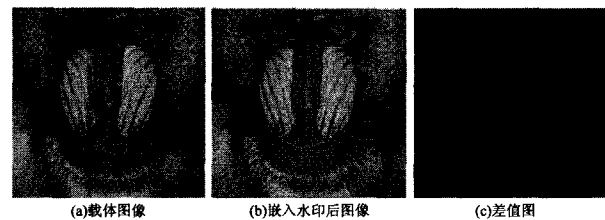


图 3 Baboon PPM 图像水印嵌入效果和差值图



图 4 Avion TIFF 图像水印嵌入效果和差值图

为了进一步测试本文算法的不可见性,我们又给出了本文算法水印图像的 PSNR 值,并与彩色图像传统的亮度嵌入方法(与本文算法同样嵌入在 DCT 直流分量中,强度系数为 1,临界可察觉状态)以及现有的两个基于四元数的彩色图像

水印算法,即文献[11,13]中提到的算法进行了比较。其中,文献[11]是首次提出的基于四元数傅氏变换的彩色图像水印算法,文献[13]是我国学者在此基础上提出的一种四元数快速傅氏变换水印算法。比较结果如表 1 所列。

表 1 不可感知性比较

	嵌入水印长度 (bit)	PSNR (dB)		
		Lena	Baboon	Avion
亮度法	1024	35.5066	35.3396	35.3371
文献[11]	经验数据	28.0331	28.8854	27.5339
文献[13]	1024	35.7998	36.0096	34.9817
本文算法	1024	41.0103	40.1405	40.0136

可以看到 PSNR 值的比较,本文算法优于传统亮度方法以及文献[11,13]方法。原因在于,传统的将水印嵌入到彩色图像亮度信息中的方法,忽略了彩色图像的色彩度以及饱和度掩蔽,在不可见性上必然会比综合考虑这 3 个因素在内的四元素方法要差;另外,作为目前领域内比较前沿的介绍四元数彩色图像水印的研究类文献,文献[11,13]虽然已经成功地将四元数傅立叶变换应用到四元数彩色图像水印领域,但是在具体实现的时候,文献[11]关心的是四元数傅立叶变换的二次复数分解方向问题,在特定的分解方向上,水印图像的 PSNR 值较高,而彩色水印图像整体的 PSNR 值则偏低;文献[13]关心的是四元数傅立叶变换执行效率问题,作者提出将水印简单地嵌入到四元数傅氏系数实部的办法给空域水印图像带来的失真要大于本文提出的方法。

6.2 鲁棒性

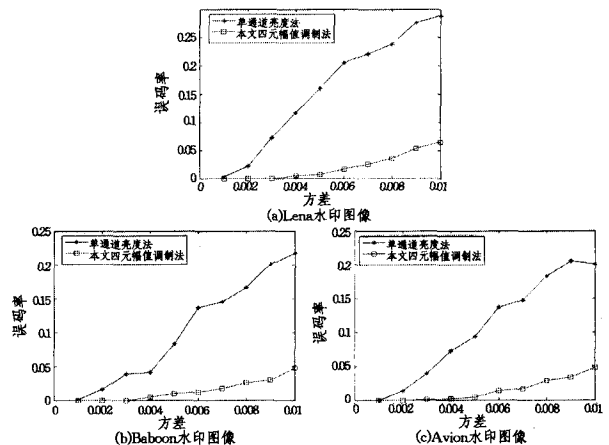


图 5 高斯噪声攻击的误码率

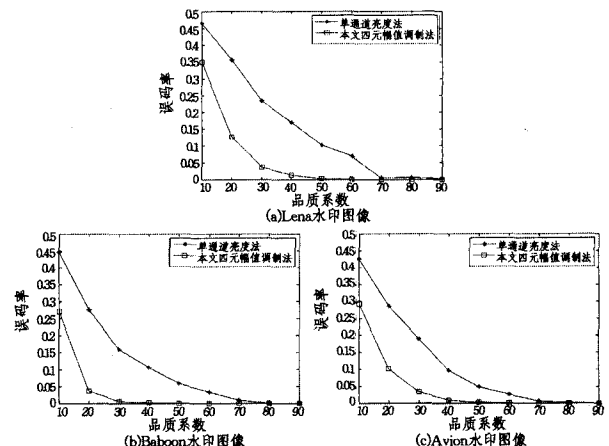


图 6 JPEG 压缩攻击的误码率

(下转第 139 页)

了参数选择方法,大大减少了公钥参数的使用;另外在消息处理中引入部分用户身份私钥来增加对随机消息的控制,使得在证明中可以容易生成任意身份和消息(ID,M)对的签名。

参 考 文 献

[1] Shamir A. Identity-based cryptosystems and signature schemes [C]// Advances in Cryptology Proceedings of Crypto '84. Berlin:Springer-Verlag,1985;47-53
[2] Waters B. Efficient identity-based encryption without random oracles[C]// Advances in Cryptology Proceedings of EuroCrypto 2005. Berlin:Springer-Verlag,2005;114-127

[3] Boyen X, Mei Q, Waters B. Direct chosen ciphertext security from identity-based techniques[C]// ACM Conference on Computer and Communications Security. New York: ACM CCS, 2005;320-329
[4] Paterson K,Schuldt J. Efficient identity-based signatures secure in the standard model[C]// Advances in Cryptology Proceedings of ACISP 2006. Berlin:Springer-Verlag,2006;207-222
[5] Narayan M S,Paramalli U. Efficient identity-based signatures in the standard model[J]. IET Inf. Secur. ,2008,2(4):108-118
[6] 李继国,姜平进. 标准模型下可证安全的基于身份的高效签名方案[J]. 计算机学报,2009,32(11):2130-2136

(上接第 126 页)

为了测试算法鲁棒性,对嵌入水印后的图像进行了各种攻击。图 5 显示了算法在不同强度的高斯噪声攻击下的误码率,图 6 显示了算法在不同品质系数 JPEG 压缩攻击下的误码率,表 2 显示的是算法在其他常见攻击下的误码率。

需要说明的是,对于嵌入的水印为二值伪随机数来说,上述图表中的数据仅反映了一次实验结果,其中的某个值并不具有实际意义。从图表中的实验数据可以看出,本文算法对各种常见攻击都能保证一定的鲁棒性,对常见攻击的误码率

均低于传统亮度方法的误码率。另外,在抵抗高斯噪声方面,本文算法效果优于文献[13],当方差为 3.5%时,本文算法提取出的水印误码率分别为 Lena 图像:0.3037,Baboon 图像:0.2412,Avion 图像:0.3291。而在相同的攻击参数下,文献[13]中的算法已经不能抵抗高斯噪声攻击;在抵抗 JPEG 压缩攻击中,本文算法的表现也优于文献[13],经品质系数为 10 的 JPEG 压缩攻击后,本文算法提取出的水印的误码率分别为 Lena 图像:0.3496,Baboon 图像:0.2695,Avion 图像:0.2923,而文献[13]中的算法在品质系数为 25 的 JPEG 压缩攻击下提取出的有意义的水印已经产生较大的失真。

表 2 算法鲁棒性测试数据(误码率)

攻击种类及参数		低通滤波(方差=1)			中值滤波			均值滤波	椒盐噪声	中央剪切
		3×3	5×5	7×7	3×3	5×5	7×7	3×3	0.02	1/16
Lena	单通道亮度法	0.0322	0.0352	0.0361	0.0020	0.0645	0.2158	0.0313	0.2031	0.0791
	本文四元数幅值调制法	0.0244	0.0322	0.0352	0.0010	0.0625	0.2119	0.0303	0.0342	0.0791
Baboon	单通道亮度法	0.0527	0.0898	0.0938	0.2559	0.4092	0.4277	0.0830	0.1113	0.0039
	本文四元数幅值调制法	0.0518	0.0889	0.0908	0.0262	0.2035	0.3344	0.0771	0.0195	0.0039
Avion	单通道亮度法	0.0859	0.1490	0.1577	0.0381	0.2100	0.3408	0.1080	0.0986	0.0654
	本文四元数幅值调制法	0.0869	0.1494	0.1582	0.0254	0.1783	0.3057	0.1094	0.0863	0.0654

结束语 将四元数模型在彩色图像处理中的应用进一步扩展到彩色图像数字水印领域,提出一种基于彩色图像四元数频域幅值调制水印算法。在对载体图像进行处理的过程中始终将彩色像素作为一个整体来处理,使得彩色通道间的光谱联系贯穿在对这个整体进行傅立叶变换以及幅值水印嵌入的过程中,在具有良好的不易感知性的同时,也保证了较好的攻击能力。基于四元数理论的彩色图像处理技术的研究尚处于起步阶段,理论体系还有待于进一步完善。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] Kutter M,Jordan F,Bossen F. Digital signature of color images using amplitude modulation[A]// SPIE[C]. 1997,3022;518-526
[2] 王向阳,杨红颖,候丽敏. 一种新的半脆弱彩色图像数字水印算法[J]. 自动化学报,2007,33(6):561-566
[3] 李晓强,薛向阳. 基于多通道的彩色图像水印方案[J]. 计算机学报,2004,27(9):1238-1244
[4] Pei S-C,Cheng C-M. Novel block truncation coding of color images using a quaternion- moment-preserving principle[J]. IEEE Transaction on Communication,1997,45(5):583-595
[5] Cai C,Mitra S K. A normalized color difference edge detector based on quaternion representation [C]// Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). Vancouver,BC,Canada,2000;816-819

[6] Sangwine S J,Evans C J,Ell T A. A colour-sensitive edge detection using hypercomplex filters[C]// Proceedings of the 10th European Signal Processing Conference(EUSIPCO). Tampere, Finland,2000,1;107-110
[7] Sangwine S J,Ell T A. Hypercomplex auto- and cross-correlation of color image[C]// Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing(ICIP). Kobe,Japan,1999;319-322
[8] Sangwine S J,Ell T A. Colour image filters based on hypercomplex convolution[J]. IEEE Proceedings-Vision,Image and signal Processing,2000,147(2):89-93
[9] Sangwine S J, Ell T A. Hypercomplex Fourier Transforms of Color Images [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2007,16(1):22-35
[10] Sangwine S J,Ell T A. Hypercomplex operators and vector correlation[C]// Proc. EUSIPCO XI European Signal Processing Conf. Toulouse,France,Sep. 2002,III;247-250
[11] Bas P,Bihan N L,Chassery J-M. Color image watermarking using quaternion Fourier transform [C]// IEEE International Conference on Acoustics. Speech, and Signal Processing. 2003; 521-524
[12] Ell T A, Sangwine S J. Decomposition of 2D Hyper- complex Fourier Transforms into Pairs of Complex Fourier Transforms [C]// European Signal Processing Conference (EUSIPCO). Tampere,Finland,2000;151-154
[13] 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