

彩色图像超复数空间的自适应水印算法

江淑红, 张建秋, 胡 波

(复旦大学电子工程系, 上海 200433)

摘 要: 针对彩色载体图像, 本文提出了一种超复数频域的自适应水印算法, 它首先对彩色载体图像进行快速超复数傅氏变换, 在超复数频谱实部选择合适频段的基础上, 再利用人类视觉系统对彩色载体图像的纹理、边缘和亮度的掩蔽特性, 对选择的频段赋予不同的掩蔽强度而嵌入水印, 从而在超复数频域内实现了一种彩色载体图像自适应的水印算法. 实验结果表明, 通过彩色图像的自适应掩蔽, 大大提高了超复数频域水印算法的不易感知性和鲁棒性, 且抗攻击性能也优于无自适应掩蔽的超复数频域水印算法; 和现有文献的比较结果验证了本算法的这些优越性.

关键词: 数字水印; 自适应数字水印; 超复数; 超复数傅氏变换

中图分类号: TP309 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2009) 08-1773-06

An Adaptive Watermarking Algorithm in the Hypercomplex Space of a Color Image

JIANG Shu-hong, ZHANG Jian-qiu, HU Bo

(Department of Electronic Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: For color host images, a novel adaptive watermarking algorithm based on hypercomplex Fourier transform is proposed in this paper. Firstly the color host image is transferred into hypercomplex frequency domain. Then some real parts of the hypercomplex frequency spectra of the color host image are selected. Based on the different mask properties of the human vision system about the texture, edge and luminance of the color host image, the selected frequency spectra are put the different mask weights for the embedded watermark. As a result, an adaptive watermarking algorithm for color host images in hypercomplex spectrum domain is realized. Experimental results show that the robustness and insensitiveness of our method are much improved by the adaptive masks of the color image. Its anti-attacking capability is also much better than the hypercomplex watermarking algorithm without adaptive masks. Comparison results with the known ones in literature verify such superiorities of the proposed algorithm.

Key words: digital watermarking; adaptive watermark; hypercomplex; hypercomplex Fourier transforms

1 引言

近年来, 数字水印技术已经成为广受关注的研究热点, 基于载体图像视觉模型的自适应水印算法也日益得到重视. 研究表明利用视觉模型来确定与图像相关的调制掩模^[1], 如图像纹理、边缘和亮度的掩蔽特性, 然后再利用其来插入水印, 在具有良好不易感知性的同时也具有鲁棒性.

当前大多数水印嵌入算法都是针对灰度图像的, 即使载体图像是彩色的, 大部分也是通过提取其亮度信息或使用单色通道的信息. 由于人眼对蓝色信息不那么敏感, Kutter 等人^[2]提出通过修改每个像素的蓝色分量实现水印嵌入. Piva 等人^[3]则提出了基于 RGB 色彩通道互相关的彩色图像水印算法. P. Y. Tsai 等人^[4]提出一种

基于色彩量化技术的彩色图像水印算法. 该算法使用主元分析 (PCA) 技术对调色板中的颜色重新排序, 分成拥有奇、偶索引的两个子调色板, 在像素映射过程中, 根据嵌入水印位和搜索到的颜色索引的奇偶性, 进行不同处理, 从而实现水印算法.

超复数通过将三色空间上的彩色图像的矢量像素视为一个整体进行描述, 体现和保留了不同色彩分量在色彩空间的特定联系, 为彩色图像的处理开辟了一个新天地, 并在彩色图像的配准、边缘检测和跟踪等多个应用领域获得了许多新结果^[5-7]. 而本文作者在文献^[8]提出了一种基于超复数傅氏变换的数字水印算法, 通过对彩色载体图像进行快速超复数傅氏变换, 在超复数频域选择合适的频段嵌入水印数据, 并且修改其对称系数的值, 在数学上解决了超复数频域嵌入水印前提条

收稿日期: 2008-03-12; 修回日期: 2009-05-04

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 60872059); 国家 973 重点基础研究发展规划 (No. 2006CB705700)

件的问题,即保证嵌入水印的载体图像仍然可以用彩色图像的红、绿、蓝三色进行传输.分析表明:提出的方法通过超复数傅氏逆变换,可以把水印带来的误差扩散到整幅图像,并且是分散到红、绿、蓝三色的各个分量上,从而实现数字水印的不易感知性和安全性的良好结合.

为了进一步提高超复数频域水印算法的不易感知性,避免因为嵌入水印而破坏视觉质量,本文通过利用人类视觉系统(HVS)的掩蔽现象,来确定在图像的各个部分所能容忍的数字水印信号的最大强度,并根据这个最大强度对嵌入水印赋予不同的掩蔽强度.实验结果表明,通过彩色图像的自适应掩蔽,大大提高了超复数频域水印算法的鲁棒性,提出的方法优于文献中已报道的彩色图像水印算法,也优于无自适应掩蔽的超复数频域水印算法.

2 彩色图像的超复数描述

超复数可以看成是复数的推广,它的表达式为:

$$a_1 + a_2 i_1 + a_3 i_2 + \dots + a_n i_{n-1} \quad (1)$$

其中, a_1, a_2, \dots, a_n 为实数, i_1, i_2, \dots, i_{n-1} 为虚数单位.

在彩色图像处理中,超复数把在三色空间上彩色图像视为一个矢量整体进行描述,彩色图像的红绿蓝(RGB)模型可以表示为如下的无实部的纯超复数(其中, (m, n) 为彩色图像中像素的坐标):

$$f(m, n) = R(m, n)i + G(m, n)j + B(m, n)k \quad (2)$$

式(2)中其虚数单位 i, j, k 之间的联系定义为:

$$\begin{cases} i^2 = j^2 = k^2 = -1 \\ ij = -ji = k, jk = -kj = i, ki = -ik = j \end{cases} \quad (3)$$

从上述定义可以看出,超复数的乘法不满足交换律.

一个普通的超复数(也称为四元数)的表示为:

$$q(m, n) = a(m, n) + b(m, n)i + c(m, n)j + d(m, n)k \quad (4)$$

式(4)表明:一个超复数有四个分量,即一个实部 $a(m, n)$ 和三个虚部 $b(m, n), c(m, n)$ 和 $d(m, n)$. 从式(2)可以发现,彩色图像的三色分量(RGB表示通过标准转换获得其它表示,如HSI表示等)是用实部为0的纯超复数加以表示的.

超复数的二维傅氏变换和逆变换^[9]为:

$$F^R(u, v) = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} (a + bi + cj + dk) e^{-\mu 2\pi(\frac{mu}{M} + \frac{nv}{N})} \quad (5)$$

$$f(m, n) = F^{-R} = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{v=0}^{M-1} \sum_{u=0}^{N-1} (A + Bi + Cj + Dk) e^{\mu 2\pi(\frac{mv}{M} + \frac{nu}{N})} \quad (6)$$

其中 μ 为单位虚向量,可以取强度图像矢量 $\mu = (i + j + k)/\sqrt{3}$ 或其它矢量. (m, n) 和 (u, v) 分别为它们在时域和频域中的坐标.通过 Ell 和 Sangwine 提出的“分解变换方法”^[10]或作者提出的快速算法^[7],利用传统的快速傅氏变换 FFT 工具,可快速地计算出彩色图像的超复数傅氏变换及逆变换.对于式(2)用 RGB 分量表示彩色图像的超复数,其超复数傅氏变换为^[7]:

$$F^R(u, v) = i(\text{real}(R_{RFT}) + \mu \cdot \text{imag}(R_{RFT})) + j(\text{real}(G_{RFT}) + \mu \cdot \text{imag}(G_{RFT})) + k(\text{real}(B_{RFT}) + \mu \cdot \text{imag}(B_{RFT})) \quad (7)$$

式(7)中 $\text{real}(p)$ 表示取复数 p 的实部, $\text{imag}(p)$ 表示取复数 p 的虚部. p_{RFT} 表示 p 的实数傅氏变换.

设其在超复数频域的实部为 $A(u, v)$, 三个虚部分别为 $C(u, v), D(u, v)$ 和 $E(u, v)$, 即:

$$F^R(u, v) = A(u, v) + iC(u, v) + jD(u, v) + kE(u, v) \quad (8)$$

那么式(8)的超复数傅氏逆变换为:

$$F^{-R}(m, n) = (\text{real}(A_{IRFT}) + \mu \cdot \text{imag}(A_{IRFT})) + i(\text{real}(C_{IRFT}) + \mu \cdot \text{imag}(C_{IRFT})) + j(\text{real}(D_{IRFT}) + \mu \cdot \text{imag}(D_{IRFT})) + k(\text{real}(E_{IRFT}) + \mu \cdot \text{imag}(E_{IRFT})) \quad (9)$$

其中, p_{IRFT} 表示 p 的实数傅氏逆变换.

3 彩色图像超复数空间的自适应水印掩蔽

本文提出的是在超复数频域的有意义水印算法,有意义水印是指水印本身也是某个数字图像(如商标图像),通常尺寸较大,如本文实验中用到的“复旦大学校徽”为 $64 \times 64 = 4096\text{bit}$;而无意义水印则只对应于一个序列号,如文献[11]中测试序列仅为 32bit . 有意义水印的优势在于,如果由于受到攻击或其他原因致使解码后的水印破损,人们仍然可以通过视觉观察确认是否有水印.

因为在 JPEG 压缩以及其他图像处理应用中, 8×8 的图像块是标准的分块尺寸,所以,为了增强水印抗攻击能力,我们把载体图像也分解为 8×8 的单位小块,对每小块进行超复数傅氏变换,在其特定的频域位置嵌入水印.作者在文献[8]中通过数学推导证明,嵌入的水印数据经过超复数傅氏逆变换后,不但把由于嵌入水印带来的误差扩散到整幅图像,而且分散到了红、绿、蓝每种颜色,使其更不易被察觉.

通过研究超复数傅氏变换的数学规律^[8]发现,选择超复数傅氏变换的实部 $A(u, v)$ 作为数字水印的嵌入区域,在中频选择一定系数嵌入水印,并修改其对称系数的值,可以使含水印的频域矩阵经过超复数傅氏逆变换后,空间域仍然是实部为0的纯虚数,即仍然可以用彩色图像的红、绿、蓝三色进行传输.我们在超复

数频域的中频段中的 14 个中频位置 ($u \neq 0, v \neq 0$), 产生 4 个作为水印的嵌入位置^[8].

为了实现数字水印的盲检测, 我们采用经典的量化索引调制(QIM)方法^[12], 根据二值水印图像中每个像素的值, 对超复数傅氏变换的实部 $A(u, v)$ 进行量化编码. 为了增强抗攻击能力, 提高水印算法的鲁棒性, 我们按照作者在文献[8]中提出的一种“交叉冗余嵌入”方式, 对水印数据进行冗余嵌入.

我们知道人类视觉系统对彩色图像的纹理、边缘和亮度有不同的掩蔽特性, 为了进一步提高水印算法的不易感知性, 避免因为嵌入水印而破坏视觉质量, 那么我们应该充分利用这些视觉掩蔽特性. 下面让我们来讨论如何利用人类视觉系统(HVS)的掩蔽现象来确定在图像的各个部分所能容忍水印的最大强度, 即如何实现彩色图像的自适应数字水印掩蔽.

3.1 彩色图像的纹理掩蔽

图像的纹理是指诸如平滑度、粗糙度和规律性等特性的度量. 可以通过一幅图像或区域的灰度级直方图的统计矩来描述纹理. 直方图的方差 σ^2 表示了灰度级对比度, 在纹理描述中特别重要, 而标准差 σ 对于大多数人来说更为直观, 所以直方图的标准差 σ 经常被用来作为纹理的度量^[13]. 直方图的方差为:

$$\sigma^2 = \sum_{i=0}^{L-1} (f_i - f_{i_mid})^2 p(f_i) \quad (10)$$

$p(f_i)$ 表示概率; L 表示灰度级的数目, 本章算法采用块自适应方法, 因为单位小块内图像灰度变化不会很大, 所以宜采用最大灰度分辨率, 对于 bmp 位图, L 取值 256; f_{i_mid} 表示每一单位小块的平均灰度级:

$$f_{i_mid} = \sum_{i=0}^{L-1} f_i p(f_i) \quad (11)$$

对于彩色图像, 我们计算红、绿、蓝每一色的直方图方差, 然后再取平均得到平均直方图方差 $\bar{\sigma}^2$:

$$\bar{\sigma}^2 = \frac{1}{3} (\sigma_R^2 + \sigma_G^2 + \sigma_B^2) \quad (12)$$

对平均方差 $\bar{\sigma}^2$ 进行归一化, 得:

$$\sigma_u^2 = \frac{\bar{\sigma}^2}{\max(\bar{\sigma}^2)} \quad (13)$$

人眼对变化平缓的平滑区域中噪声的敏感度要高于纹理变换频繁的区域, 所以在高纹理区域, 嵌入水印的强度应该更强. 我们把图像的纹理掩蔽因子分成 5 级, 观察发现, σ_u 区分度太大, 如果分 5 级, 多数都会为 0. 所以, 我们用 σ_u 的平方根作为纹理掩蔽的描述子, 并把它规整为 0~5 级.

$$M_T = \text{round}(5 \sqrt{\sigma_u}) \quad (14)$$

其中, $\text{round}(x)$ 表示对 x 进行四舍五入.

3.2 图像的边缘掩蔽

对于彩色图像来说, 其边界的定义比灰度图像边界的定义复杂得多, 既要考虑图像的亮度变化又要考虑色度变换. Sangwine 等人提出一种超复数彩色边缘检测算法^[6], 通过对超复数表示的 RGB 彩色图像进行左右滤波卷积计算, 在超复数空间对彩色图像进行 90° 旋转变换, 把彩色变化比较激烈区域映射为彩色区域, 把彩色变化平缓区域映射为灰色区域. 通过分离变换图像中的彩色分量, 实现彩色图像边缘的检测.

彩色图像的边缘有 90% 与其对应的灰度图像是相一致, 只有 10% 左右可能无法从其灰度图像中获得^[14]. 所以, 为了简便起见, 也可以采用现有源程序的经典的灰度图像算法提取图像的边缘, 例如: 公认的提取边缘效果比较理想的 canny 边缘算子. 上述两种不同的边缘提取算法产生的边缘掩蔽因子对最终的数字水印效果影响不大. 人眼对图像的边缘比较敏感, 所以对含边缘点较多的单位小块应该赋予较小的水印强度. P_E 表示 8×8 单位小块中边缘点的和, 则归一化后的 5 级边缘掩蔽因子为:

$$M_E = \text{round}\left(\frac{5 P_E}{\max(P_E)}\right) \quad (15)$$

3.3 超复数彩色图像的亮度掩蔽

Soo-Chang Pei 等人提出了一种超复数极坐标模型^[15], 把建立在 RGB 模型的超复数表示转化为用超复数的 HSI(色调、饱和度、强度)模型, 在这个超复数极坐标模型中, 彩色图像的亮度 f_A 由超复数模值 $|q| = \sqrt{f_R^2(m, n) + f_G^2(m, n) + f_B^2(m, n)}$, 是一个与 HSI 模型中饱和度、强度有关的量.

人眼对不同的亮度区域的噪声敏感度不同, 通常对中等亮度最为敏感, 向低亮度和高亮度两个方向下降. 所以我们在进行数字水印时, 要对载体彩色图像进行亮度掩蔽. 我们采用超复数的 HSI 模型, 计算出彩色图像的亮度 f_A , 每个 8×8 单位小块的平均亮度值为:

$$\bar{f}_A = \frac{1}{64} \sum_{block} f_A \quad (16)$$

则亮度掩蔽的描述子如下式所示:

$$P_l = (\bar{f}_A - \bar{f}_{mid})^2 \quad (17)$$

其中, \bar{f}_{mid} 表示图像的中等亮度, 对于 24 位的彩色 bmp 图像是:

$$\bar{f}_{mid} = \sqrt{(256/2)^2 + (256/2)^2 + (256/2)^2} = \sqrt{3} \times 128 \quad (18)$$

归一化后的 5 级亮度掩蔽因子为:

$$M_l = \text{round}\left(\frac{5 P_l}{\max(P_l)}\right) \quad (19)$$

综合考虑上述彩色图像的纹理、边缘和亮度掩蔽特性, 彩色图像的自适应数字水印掩蔽因子为:

$$J_l = M_T - M_E + M_l \quad (20)$$

然后去除 $M_T - M_E + M_l$ 的最大值和最小值, 再把得到的结果规整为 0~5 级, 数值加 1, 获得最终的 1~6 级自适应掩蔽因子 J_l .

4 完整的水印算法描述

水印嵌入: 设载体图像 f_0 是尺寸为 512×512 的彩色 bmp 图像, 水印图形 wm 是尺寸为 M_m 行 \times N_m 列的二值图形. 把 wm 排列成一维序列, 则共有 $M_m \times N_m$ 个数据. 水印嵌入步骤如下:

(1) 采用密钥 Key 控制的伪随机数发生器, 伪随机地选择 $M_m \times N_m$ 个整数(取值范围是 1~14), 作为数字水印的嵌入位置. 根据作者在文献[8]中的方法, 对载体图像进行分块.

(2) 把载体图像 f_0 分成 8×8 的单位小块, 根据每个单位小块的纹理、边缘和亮度, 按照本文第 3 章的规则, 生成 1~6 级别的自适应掩蔽因子 J_l .

(3) 对载体图像 f_0 的每一个 8×8 单位小块按照式(7)进行彩色图像的超复数傅氏变换, 得到: $F^R(u, v) = A(u, v) + iC(u, v) + jD(u, v) + kE(u, v)$.

(4) 按照作者在文献[8]中提出交叉冗余嵌入规则, 在每个单位小块的超复数傅氏变换 $F^R(u, v)$ 的实数部分 $A(u, v)$ 中的对应 4 个嵌入位置, 用量化索引调制(QIM)方法嵌入水印数据, 同时修改其对称系数的值. 每个单位小块的量化单位 Δ 为该单位小块的自适应掩蔽因子 J_l 和最小量化单位 Δ_0 的乘积.

(5) 把所有的嵌入水印的单位小块, 按照式(9)进行超复数傅氏逆变换, 得到水印图像 f_{wm} .

水印检测: 水印检测方式为不需要原始载体图像参与的盲检测. 检测方必须知道数字水印的嵌入位置密钥 Key, 最小量化单位 Δ_0 和水印图形的尺寸 (M_m 行 \times N_m 列).

5 水印算法的实验分析

5.1 图像质量评价函数

为了对数字水印算法的不可感知性进行度量, 就要对含水图像进行质量评价, 表示它与原始图像之间的失真程度. 均方差(MSE)和峰值信噪比(PSNR)的方法计算简单, 因此得到了广泛的使用. 但是这两种方法都是基于两幅图像各像素之间的亮度差异来计算的, 有一定的局限性. 所以, 现在越来越多的研究集中在适合于人类系统的感知质量测量. 和文献[1]一样, 我们采用“加权峰值信噪比”(WPSNR)^[16]来进行含水图像的质量评价. WPSNR 由下式给出:

$$WPSNR = 20 \log_{10} \left(\frac{255}{\sqrt{MSE \times NVF}} \right) \quad (21)$$

其中, NVF 表示噪声可见度函数, 由下式给出^[16]:

$$NVF = \frac{1}{1 + \theta \sigma_{block}^2}, \theta = \frac{D}{\max(\sigma_{block}^2)} \quad (22)$$

这里, σ_{block}^2 表示每个 8×8 单位小块的亮度的方差, θ 表示对 σ_{block}^2 进行归一化操作.

5.2 比较实验的实验结果

为了验证本文算法的性能, 以下分别给出了超复数频域水印算法的检测性能测试、抗攻击能力测试的实验结果, 并与 2007 年 A K Parthasarathy 等人在 IEEE Transactions on Broadcasting 上提出的自适应掩蔽的有意义水印算法^[1]进行了对比. 实验中, 所选用的原始载体为 512 行 \times 512 列的标准彩色 bmp 图像 Lena, 水印图形如图 1(a)、(b)所示, 分别为复旦大学校徽和 ET 符号. ET 符号是文献[1]采用的水印图形. 我们采用的最小量化单位为 $\Delta_0 = 0.05$. 本文数字图像水印算法具有良好的不可感知性, 含水图像与原始图像之间的失真较小, 嵌入复旦大学校徽的水印图像如图 1(c)所示, 其峰值信噪比 $PSNR = 35.7988$, 加权峰值信噪比 $WPSNR = 38.9824$; 嵌入 ET 符号的水印图像如图 1(d)所示, 其 $PSNR = 35.2601$, $WPSNR = 38.5248$. 与之对比的是, 文献[17]的超复数频域水印嵌入算法的不可感知性就比较差, 其 $MSE = 100$, 即 $PSNR = 28.03$.



(a) 复旦大学校徽

ET

(b) ET符号



(c) 嵌入图形(a)的水印图像



(d) 嵌入图形(b)的水印图像

图1 lena载体图像嵌入水印数据后的水印图像

图 2 表现的是嵌入复旦大学校徽的载体图像经受 JPEG 压缩攻击的情况. 图 2 中 JPEG 压缩的品质因子为 $q = 70$, 图 2(a) 为受到 JPEG 压缩后的含水图像; 图 2(b) 是 4 个冗余水印图形; 取平均得到灰度水印图形见图 2(c); 最后把灰度水印图像转化为二值水印图形, 如图 2(d) 所示, 此时误码率是 3.74%. 当前很多有意义彩色图像数字水印方法对于 JPEG 压缩攻击的抵挡能力都不太理想, 例如文献[4]的颜色量化技术的彩色图像数字水印方法, 对于尺寸同样为 64 行 \times 64 列的水印图形, JPEG 压缩的品质因子为 $q = 80$ 时, 误码率就达到了

27.30% ;而采用本文的超复数频域数字水印算法,当 JPEG 压缩 $q = 80$ 时,误码率只有 1.17%,大大优于文献 [4] 水印算法的抵抗 JPEG 攻击性能.

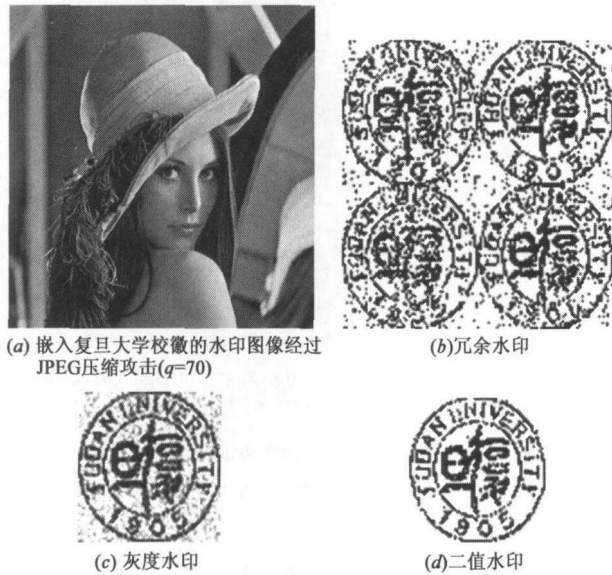


图2 嵌入复旦大学校徽水印图形的水印图像受到 JPEG 压缩攻击的情况

下面给出本文算法和无自适应掩蔽的超复数频域水印算法^[8]、以及文献[1]算法在抵抗 JPEG 压缩性能方面的比较,嵌入的水印图形是 ET 符号.由图可知,当 JPEG 压缩的品质因子 $q \geq 45$ 时,文献[1]算法可以完整地恢复出水印图形;当 JPEG 压缩 $q \geq 50$ 时,有/无自适应掩蔽的超复数水印算法都可以完整地恢复出水印图形.三种算法的抵抗 JPEG 压缩能力都比较好,大大优于文献[4]算法(文献[4]当 JPEG 压缩 $q = 80$ 时,误码率就达到了 27.30%).但是当 JPEG 压缩率越来越大,即其品质因子继续下降时,文献[1]水印算法的鲁棒性就越来越差,如图 3(c)所示,当 $q = 35$ 时,其恢复出的水印图形已经严重失真;无自适应掩蔽的超复数水印算法在 $q = 25$ 时仍能看到较完整的水印图形,如图 3(h)所示;本文算法对于 JPEG 压缩的鲁棒性就更好,即使

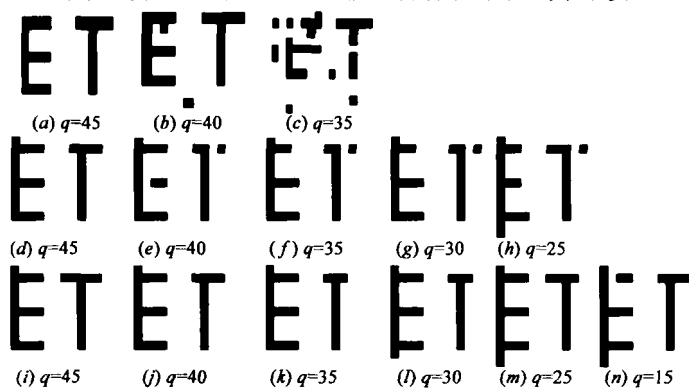


图3 不同品质因子 JPEG 压缩后的提取水印图形 (其中 (a)-(c)是 Parthasarathy 的水印算法[1];(d)-(h)是无自适应掩蔽的超复数水印算法;(i)-(n)是本文算法)

当 $q = 15$ 时仍能看到较完整的水印图形,如图 3(n)所示.而且由图可看出,本文算法在 $q = 15$ 时的误码率,要比无自适应掩蔽超复数水印算法在 $q = 25$ 时的误码率还要小.

我们再从抵抗噪声攻击方面,比较本文算法与无自适应掩蔽的超复数频域水印算法^[8]、以及文献[1]算法的鲁棒性.图中 σ^2 表示加入高斯噪声的方差.由图可知,文献[1]算法抵抗噪声能力较差,当 $\sigma^2 = 2\%$ 时,其恢复出的水印图形已严重失真;而无自适应掩蔽超复数水印算法,当 $\sigma^2 = 2\%$ 至 $\sigma^2 = 3\%$ 时,都能恢复出较完整的水印图形,当 $\sigma^2 = 3.5\%$ 时才不能抵抗攻击.本文算法因为采用了彩色图像的自适应掩蔽,所以对于高斯噪声的鲁棒性大大提高了,由图 4(c)和图 4(j)可知,本文算法在 $\sigma^2 = 3.5\%$ 时的误码率,和无自适应掩蔽超复数水印算法在 $\sigma^2 = 2.5\%$ 时的误码率相当;直到 $\sigma^2 = 4\%$ 时,本文算法才不能抵抗高斯噪声的攻击.

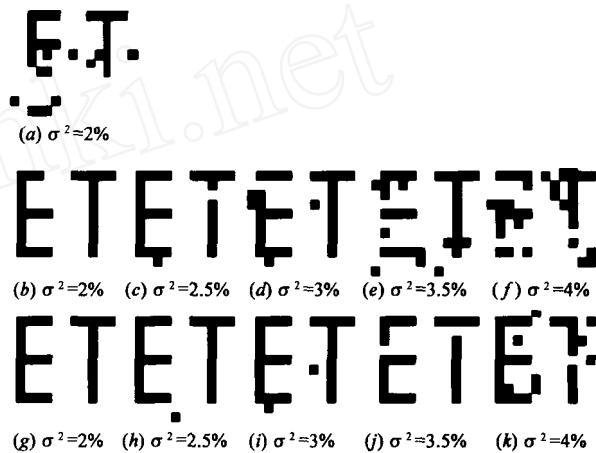


图4 加入不同方差的高斯噪声后的提取水印图形 (其中 (a)是文献[1]的水印算法;(b)-(f)是无自适应掩蔽的超复数水印算法;(g)-(k)是本文算法)

6 结论

本文提出的是一种彩色图像超复数空间的自适应水印算法.该算法首先对彩色载体图像进行超复数建模,通过利用人类视觉系统(HVS)的掩蔽现象,即人类视觉系统对彩色载体图像的纹理、边缘和亮度的掩蔽特性,来确定在图像的各个部分所能容忍的数字水印信号的最大强度,然后对彩色载体图像进行超复数傅氏变换,选择合适的频段,按照交叉冗余规则和彩色图像自适应掩蔽强度来嵌入水印数据.实验表明,本文水印算法具有很好的不易感知性;加入了彩色图像自适应掩蔽,进一步提高了水印算法的鲁棒性,抵抗 JPEG 压缩等攻击的性能优于无自适应掩蔽的超复数频域水印算法;和现有文献的比较结果,也验证了本算法的优越性.

参考文献:

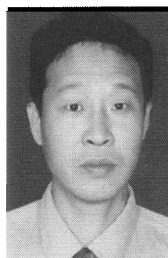
- [1] A K Parthasarathy, S Kak. An Improved Method of Content Based Image Watermarking [J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2007 53(2): 468 - 479
- [2] M Kutter, F Jordan, E Bossen. Digital signature of color images using amplitude modulation [A]. In: Proceedings of SPIE Electronic Imaging 97, Storage and Retrieval for Image and Video Databases V [C]. San Jose, California USA, Feb. 1997: 518 - 526.
- [3] A Piva, M Barni, E Bmolini, V Cappellini. Exploiting the cross-correlation of rgh-channels for robust watermarking of color images [A]. In: IEEE International Conference on Image Processing (ICIP) [C]. Kobe, Japan, Oct. 1999, 1: 306 - 310.
- [4] P Y Tsai, Y C Hu, C C Chang. A Color Image Watermarking Scheme Based on Color Quantization [J]. Signal Processing, 2004, 84(1): 95 - 106
- [5] C E Moxey, S J Sangwine, T A Ell. Hypercomplex correlation techniques for vector images [J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2003; 51(7): 1941 - 1953.
- [6] S J Sangwine. Color image edge detector based on quaternion convolution [J]. Electronics Letters, 1998, 34(10): 969 - 971.
- [7] 江淑红, 郝明非, 张建秋和胡波. 快速超复数傅氏变换和超复数互相关的新算法及应用 [J]. 电子学报, 2008, 36(1): 100 - 105.
Jiang Shu-hong, Hao Ming-fei, Zhang Jian-qiu, HU Bo. Novel algorithms for fast hypercomplex Fourier transform and hypercomplex correlation with applications [J]. Chinese Journal of Electronics, 2008, 36(1): 100 - 105. (in Chinese)
- [8] 江淑红, 张建秋, 胡波. 超复数频域的有意义数字水印算法 [P]. 专利申请号: 200810034027
- [9] S J Sangwine, T A Ell. The discrete Fourier transform of a colour image [A]. In: J M Blackledge, M J Turner. Image Processing II Mathematical Methods, Algorithms and Applications [M]. Chichester, U. K. : Ellis Horwood, 2000: 430 - 441.
- [10] T A Ell, S J Sangwine. Decomposition of 2D hypercomplex Fourier transforms into pairs of complex Fourier transforms [A]. In: Proceedings of the tenth European Signal Processing Conference (EUSIPCO) [C]. Tampere, Finland, Sep. 5 - 8, 2000: 151 - 154.
- [11] Xiangyang Wang, Jun Wu, Panpan Niu. A new digital image watermarking algorithm resilient to desynchronization attacks [J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2007, 2(4): 655 - 663
- [12] B Chen, G W Womell. Quantization index modulation: A class of provably good methods for digital watermarking and information embedding [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2001, 47(4): 1423 - 1443
- [13] Rafael C. Gonzalez, Richard E. Woods, Digital Image Processing [M]. second Edition, Prentice Hall, 2002
- [14] C L Novak, S A Shafer. Color edge detection [A]. In: Proceedings of DARPA Image Understanding Workshop [C]. 1987: 35 - 37.
- [15] S-C Pei, J-H Chang, J-J Ding. Commutative reduced biquaternions and their Fourier transform for signal and image processing applications [J]. IEEE transactions on signal processing, 2004, 52(7): 2012 - 2031.
- [16] Q. Pei. Impact analysis of digital watermarking on perceptual quality using HVS models [OL]. Available: www. ece. wisc. edu/hu/ece738 /project/s05proj/qi. ppt.
- [17] P Bas, N Le Bihan, J - M Chassery. Color image watermarking using quaternion Fourier transform [A]. In: IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP '03) [C]. April 6 - 10, 2003, 3: III - 521 - 4

作者简介:



江淑红 女, 博士, 1977 年生于江西省上饶, 2008 年 7 月毕业于复旦大学电子工程系, 获博士学位. 主要从事数字信号与图像处理、智能仪器等研究.

E-mail: 041021019@fudan. edu. cn



张建秋 男, 博士, 现任复旦大学电子工程系教授, 博士生导师, IEEE 高级会员. 主要研究方向: 信息处理理论及其在新型传感器、仪器和测量、图像处理中的应用.

E-mail: jqzhang01@fudan. edu. cn

胡波 男, 博士, 现任复旦大学电子工程系教授, 博士生导师, IEEE 电路与系统分会盲信号处理技术委员会委员. 主要研究方向: 数字信息处理、数字通信等方面的算法和实际应用.