

# 基于图像属性的 Coiflet 域数字水印算法

王 演, 梁德群, 王彦春, 张 旗

(大连海事大学信息工程学院, 辽宁大连 116026)

**摘 要:** 水印是由具有良好伪随机性的二值混沌序列构成的, 为了实现水印图像在稳健性和不可见性之间的折衷, 嵌入因子是由 3 个分因子构成的: 信噪比(SNR)因子  $\alpha$ , 活动度因子  $\beta$  和兴趣因子  $\gamma$ .  $\alpha$  是从 SNR 的要求算出的最佳水印强度因子,  $\beta$  表示了人类视觉系统(HVS)对图像的平滑区、边缘区和纹理区的不同感知特性,  $\beta$  是在  $l^3$  空间计算的. 考虑到人眼视觉的选择性, 通过  $\gamma$  对图像中感兴趣区(ROI)嵌入的水印强度进行适当的调整, 以提高水印图像的视觉效果. 实验结果表明, 本文算法是有效的.

**关键词:** 数字水印; 图像属性; 感知特性; 小波变换

**中图分类号:** TN391 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2006)12-2214-04

## Image Characteristics-Based Coiflet Domain Digital Watermarking Algorithm

WANG Yan, LIANG De-qun, WANG Yan-chun, ZHANG Qi

(Information Engineering College, Dalian Maritime University, Dalian, Liaoning 116026, China)

**Abstract:** The watermark is constructed by dyadic value chaotic sequence, which has very good pseudorandom properties. In order to perform the tradeoff between robustness and imperceptibility, the embedding factor consists of three sub-factors: signal to noise ratio(SNR) factor  $\alpha$ , activity measure factor  $\beta$  and interest factor  $\gamma$ .  $\alpha$  is obtained through determining the optimal watermarking intensity, based on SNR.  $\beta$  represents different perceptual significances of human visual system(HVS) to smooth, edge and textured regions of image.  $\beta$  is calculated in the  $l^3$  space. Due to the HVS selectivity, the inserted watermark intensity is adjusted suitably by  $\gamma$  in the region of interest(ROI), so that the visual effect of the watermarked image can be enhanced. The experimental results show that the algorithm is effective.

**Key words:** digital watermark; image characteristics; perceptual property; wavelet transform

## 1 引言

现代互联网的发展, 促进了多媒体数字产品的广泛传播. 数字产品的版权保护日益成为迫切需要解决的问题. 作为数字产品版权保护的有效手段, 数字水印技术近年来得到了迅速发展. 一个有效的水印算法必须满足两个基本要求<sup>[1,2]</sup>: 不可见性和稳健性. 这两个要求是相互矛盾的. 如何选择恰当的水印嵌入位置和强度是数字水印算法的关键之一.

由于小波变换具有时频局部化和多分辨率特性, 它能够将信号能量主要聚集在少数小波系数上, 因此目前小波域水印已成为研究热点. 为了实现水印的不可见性和鲁棒性, 水印算法应当与图像本身的属性以及 HVS 相结合. 水印图像质量的好坏, 一方面取决于水印图像与原始图像之间的差异, 差异越小, 不可见性越好. 这种差异是用信噪比(SNR)等参量来衡量的. 另一方面, 由于图像的信息是由人眼接收的, 因此还取决于 HVS. 如果水印图像中存在视觉不敏感的失真, 或者失真出现在视觉不感兴趣的区域, 则不可见性变好. 心理物理学研究证明, 图像是由三种不同感知特性的区域组成的: 平滑区、边缘区和纹理区, 即三分量图像模型<sup>[3-9]</sup>. HVS 对三种区域有不同的感知特性: 在辨认图像中的客体时, 边缘区起着重要的作

用, 而平滑区和纹理区起着次要作用. HVS 对平滑区中的微小变化非常敏感, 边缘区次之, 对纹理区的变化不太敏感. 另外, 人类视觉对图像中的不同区域具有不同的兴趣, 即人眼具有视觉兴趣特性. 人们在观察和分析一幅图像时常常对其中的某些区域感兴趣, 而整幅图像的视觉质量在一定程度上依赖于感兴趣区(ROI)的图像质量. 感兴趣区的选择是比较困难的, 而且因人而异. 例如, 在前景为人物时, 人脸区很有可能是 ROI, 而背景区不太引起人们的注意<sup>[7,8]</sup>. 因此为了提高水印的不可见性, 水印应当少嵌入或不嵌入 ROI.

本文采用具有消失矩的 Coifman 小波<sup>[9]</sup>. 由于这种小波及其尺度函数具有  $L$  阶消失矩, 因此它具有多种优点. 为了兼顾水印的稳健性和不可见性, 在本文的算法中, 嵌入因子是由 3 个分因子组成的, 它们是信噪比因子  $\alpha$ , 活动度因子  $\beta$  和兴趣因子  $\gamma$ .  $\alpha$  是从信噪比的要求计算出来的嵌入图像的最佳水印强度因子.  $\beta$  表示 HVS 对图像平滑区、边缘区和纹理区的不同感知特性. 本文引入了检测峰值-阈值增益 PTG. 对不同的感知区, 嵌入的水印强度  $\beta$  是自适应的. 鉴于人眼视觉具有选择性, 对图像的感兴趣区和不感兴趣区的水印强度由  $\gamma$  进行调整, 以提高水印图像的视觉效果. 水印只嵌入到  $HL_j$  和

$HL_j(j=1, 2, 3)$  6 个子带中. 它们属于图像的中频分量, 可以兼顾水印的稳健性和不可见性<sup>[10]</sup>. 本文采用盲检测, 不需要原始图像.

## 2 水印的产生

混沌序列比普通的伪随机序列具有更好的安全性. 混沌序列对初始值非常敏感, 即使初始值有微小的变化, 也会得到完全不同的轨迹. Logistic 映射的混沌序列为<sup>[11]</sup>:

$$x_{k+1} = \mu x_k(1 - x_k), \mu \in [0, 4], x_k \in (0, 1), k = 0, 1, 2, \dots \quad (1)$$

初始值  $x_0$  在  $(0, 1)$  选取,  $\mu = 3.93$ . 以 0.5 为阈值, 单极序列  $\{x_k\}$  可以转换成二值序列, 即

$$w(x_k) = \begin{cases} -1, & 0 \leq x_k \leq 0.5 \\ 1, & 0.5 \leq x_k \leq 1 \end{cases} \quad (2)$$

将序列  $W = \{w_k, k = 1, 2, L, K\}$  作为水印信号嵌入到图像中.

## 3 图像的小波变换

在作 3 层小波分解后, 图像被分成 1 个轮廓子带  $LL_3$  和 9 个细节子带  $HL_j, LH_j$  和  $HH_j, j = 1, 2, 3$  为分解层次, 如图 1 所示<sup>[9]</sup>. 这 10 个子带中的尺度函数系数和小波系数分别为

$$\begin{cases} LL_3: \{c_{3,k,l} \mid k, l \in Z\} \\ LH_j: \{d_{j,k,l} \mid k, l \in Z\} \\ HL_j: \{2d_{j,k,l} \mid k, l \in Z\} \\ HH_j: \{3d_{j,k,l} \mid k, l \in Z\} \end{cases} \quad (3)$$

将 Barbara 图像  $I$  分割成  $M \times N$  个  $8 \times 8$  的子图  $I_{m,n}$ , 用 Coiflet  $L = 2$  对每个  $I_{m,n}$  进行 3 层小波变换, 各子带中的系数如式 (3) 所列, 但应在下标  $j$  的前面加上  $m, n$ . 例如

$$IH_{m,n,j}: \{1d_{m,n,j,k,l} \mid k, l \in Z\}, 1 \leq m \leq M, 1 \leq n \leq N \quad (4)$$

将  $I_{m,n}$  中子带  $LH_j$  和  $HL_j(j = 1, 2, 3)$  的小波系数进行排列, 于是式 (3) 可写成

$$\begin{cases} IH_{m,n}: \{1d_{m,n,p} \mid 1 \leq p \leq P\} \\ HL_{m,n}: \{2d_{m,n,p} \mid 1 \leq p \leq P\} \end{cases}, 1 \leq m \leq M, 1 \leq n \leq N \quad (5)$$

再将  $LH$  和  $HL$  子带中的所有小波系数排成一行, 即

$$D_{m,n} = \{1d_{m,n}, 2d_{m,n,p}, 1 \leq p \leq P\} = \{d_{m,n,q}, 1 \leq q \leq Q\} \quad (6)$$

最后将所有小波系数排成一行, 即

$$D = \{d_k, 1 \leq k \leq K\} \quad (7)$$

## 4 水印的嵌入

采用加法准则, 对于  $D_{m,n}$  有

$$\tilde{d}_{m,n,q} = d_{m,n,q} + \lambda \theta_{m,n} \omega_{m,n,q} = d_{m,n,q} + \lambda \alpha_{m,n} \beta_{m,n} \gamma_{m,n} u_{m,n,q} \quad (8)$$

式中  $D_{m,n,q}$  和  $\tilde{d}_{m,n,q}$  分别为水印嵌入前、后的小波系数,  $w_{m,n,q}$  为二值水印中的一个子序列,  $\theta_{m,n}$  为嵌入因子, 它由 3 个分因子组成.  $\lambda$  为水印强度调节常数. 适当的选择  $\lambda$ , 使水印图像的峰值信噪比  $\text{PSNR} \approx 40$ . 此时人眼很难看出水印图像和原始图像之间的差别. 通过实验, 本文取  $\lambda = 1$ . 因此, 对于嵌入水印的子图  $I_{m,n}$ , 有

$$\tilde{D}_{m,n} \{ \tilde{d}_{m,n,q}, 1 \leq q \leq Q \} \quad (9)$$

而对于嵌入水印的整个图像  $I$ , 有

$$\tilde{D} = \{ \tilde{d}_k, 1 \leq k \leq K \} \quad (10)$$

下面分别计算  $\alpha_{m,n}$ ,  $\beta_{m,n}$  和  $\gamma_{m,n}$ .

### 4.1 信噪比因子

按照 SNR 评测标准, 为了保证水印图像的质量, 要求 SNR 不小于阈值  $th = 35 \text{ dB}$ . 于是有<sup>[12]</sup>

$$\begin{aligned} th &\leq 10 \lg \frac{\sum_q |d_{m,n,q}|^2 / \sum_q |d_{m,n,q} - \tilde{d}_{m,n,q}|^2}{\sum_q |\alpha_{m,n} u_{m,n,q}|^2} \\ &= 10 \lg \frac{\sum_q |d_{m,n,q}|^2 / \sum_q |\alpha_{m,n} u_{m,n,q}|^2}{\sum_q |\alpha_{m,n} u_{m,n,q}|^2} = Q \alpha_{m,n}^2 \leq \sum_q |d_{m,n,q}|^2 \cdot 10^{th/10} \\ &= \sum_q |d_{m,n,q}|^2 \cdot 10^{3.5} \end{aligned}$$

$$\alpha_{m,n} \leq \frac{1}{10^{3.5} Q} \sum_q |d_{m,n,q}|^2, 1 \leq m \leq M, 1 \leq n \leq N \quad (11)$$

### 4.2 活动度因子

基于视觉心理学的图像分割算法<sup>[4-6]</sup>, 将图像分割成不同视觉意义的三部分: 平滑区、边缘区和纹理区. 活动度  $\beta$  能够有效地描述图像的属性: 背景变化越大, 纹理越复杂,  $\beta$  就越大; 反之,  $\beta$  越小. 对于视觉掩盖来说, 在  $\beta$  大的区域嵌入较强的水印, 在  $\beta$  小的区域嵌入较弱的水印.

首先计算  $D_{m,n}$  的平均距离  $S_{m,n}$ .  $S_{m,n}$  是在  $p$  幂收敛点列空间  $l^p$  中计算的, 即

$$\begin{cases} S_{m,n} = \frac{1}{Q} \left[ \sum_q |d_{m,n,q} - d_{m,n}|^p \right]^{1/p}, 1 \leq p \leq \infty \\ d_{m,n} = \frac{1}{Q} \sum_q d_{m,n,q} \end{cases} \quad (12)$$

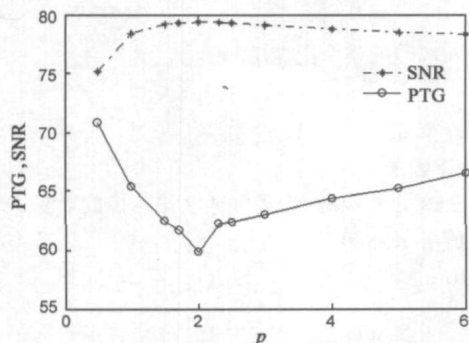
实验表明, 水印图像的不可见性和稳健性与  $p$  值有关. 为了比较不同条件下的稳健性, 定义检测峰值-阈值增益 ( $PTG$ ) ( $z, T$  含义见式 (17) 和 (18)) 为

$$PTG = 10 \lg(z/T)^2 \quad (13)$$

显然,  $PTG$  越大, 稳健性越好. 本文分别计算了不可见性和几种常见攻击下的  $PTG_i$  值, 其中  $PTG_1, PTG_2, \dots, PTG_5$  分别对应于不可见性检测, JPEG 压缩, 高斯噪声, 椒盐噪声和剪切攻击. 用它们的和值  $PTG = \sum_i PTG_i$  来衡量系统的稳健性. 另外还计算了 SNR 随  $p$  的变化. 这些数据如表 1 所列, 而  $PTG$  和 SNR 随  $p$  的变化如图 2 所示. 由表 1 和图 2 可知,  $p = 2$  时  $PTG$  有最小值, 稳健性最差; 而 SNR 有最大值, 不可见性最好. 当  $p$  偏离 2 时, 稳健性增强, 不可见性变差. 为了在稳健性和不可见性之间折衷, 选取  $p = 3$ , 对应的空间为  $l^3$ .

表 1  $PTG_p$ ,  $PTG$  和 SNR 随  $p$  的变化

$p$	0.5	1	1.5	1.7	2	2.3	2.5	3	4	5	6
$PTG_1$	17.24	16.77	16.30	16.23	16.14	16.27	16.28	16.43	16.50	16.57	16.58
$PTG_2$	10.49	8.61	7.98	7.70	7.66	7.69	7.75	7.95	8.25	7.90	8.10
$PTG_3$	12.66	11.60	10.33	10.26	10.11	11.03	11.03	11.19	11.67	11.96	12.61
$PTG_4$	15.00	14.30	14.19	13.94	13.50	13.66	13.73	13.75	14.14	14.88	15.09
$PTG_5$	15.43	14.17	13.68	13.56	12.44	13.60	13.60	13.67	13.83	13.96	14.21
$PTG$	70.81	65.44	62.48	61.68	59.85	62.24	62.40	63.00	64.40	65.26	66.59
SNR	75.20	78.43	79.19	79.29	79.33	79.30	79.26	79.11	78.79	78.52	78.31

图2 PTG与SNR随 $p$ 的变化

下面计算  $\beta_{m,n}$ . 用  $S_{m,n}$  对  $D_{m,n}$  中的小波系数进行二值化<sup>[5]</sup>, 即

$$b_{m,n,q} = \begin{cases} 1, & |d_{m,n,q}| \geq S_{m,n} \\ 0, & |d_{m,n,q}| < S_{m,n} \end{cases} \quad (14)$$

$D_{m,n}$  中的活动度  $\beta_{m,n}$  为

$$\beta_{m,n} = \frac{1}{Q} \sum_q b_{m,n,q} \quad (15)$$

$I_{m,n}$  中的纹理性越强, 则“1”点的个数也就越多,  $\beta_{m,n}$  也就越大. 在边缘区, “1”点主要聚集在边缘附近. 在平滑区, “1”点很少,  $\beta_{m,n}$  也就很小.

#### 4.3 兴趣因子

由于人眼具有视觉兴趣特征, 因此在感兴趣区, 适当地减少水印强度, 可以明显提高水印图像的主观感受水平. 对于 Barbara 图, 本文选其脸部为感兴趣区, 如图3所示, 该区包含88个子图. 在感兴趣区的各子图中, 兴趣因子均取0.5.

通过小波逆变换, 便可得到嵌入水印后的图像 $\tilde{I}$ .



图3 感兴趣区

### 5 水印检测

水印图像 $\tilde{I}$ 通过信道传输后(可能受到噪声污染或各种攻击), 在接收端成为待测图像 $I^*$ . 本文采用相关检测器.

将待测图像 $I^*$ 分成 $M \times N$ 个子图像 $I_{m,n}^*$ , 对每个子图作3层 Coifman 小波分解, 于是得到待测序列 $D_{m,n}^*$ 和 $D^*$ 为

$$\begin{cases} D_{m,n}^* = \{d_{m,n,q}^*, 1 \leq q \leq Q\} \\ D^* = \{d_k^*, 1 \leq k \leq K\} \end{cases}, 1 \leq m \leq M, 1 \leq n \leq N \quad (16)$$

计算 $D^*$ 和水印序列 $W$ 之间的相关值, 即

$$z = \frac{1}{K} D^* W = \frac{1}{K} \sum_k d_k^* w_k \quad (17)$$

式中 $K$ 是嵌入水印的小波系数个数, 即水印序列的长度.

根据 $z$ 是否大于检测阈值 $T$ 来判断原始图像中是否嵌入了水印: 当 $z > T$ 时, 图像中含有水印; 当 $z < T$ 时, 不含水印.

根据NP准则, 应当由给定的虚警概率来确定阈值 $T$ . 当虚警概率为 $p$ 时, 阈值 $T$ 为<sup>[13, 14]</sup>

$$T = \sqrt{2} \sigma_z \operatorname{erfc}^{-1}(2p) \quad (18)$$

式中 $\operatorname{erfc}^{-1}$ 为反互补误差函数,  $\sigma_z^2$ 为 $z$ 的方差, 即

$$\sigma_z^2 = \frac{1}{K} \sigma^2 = \frac{1}{K^2} \sum_k (d_k^* - \bar{d}^*)^2 \quad (19)$$

式中 $\sigma^2$ 是 $D^*$ 的方差. 选取 $p = 10^{-5}$ , 于是 $T = 3\sqrt{2}\sigma_z$ . 对于相同的 $\tilde{D}$ 在受到不同的失真后,  $D^*$ 是不同的, 因此 $T$ 也是不

同的.

## 6 实验结果和讨论

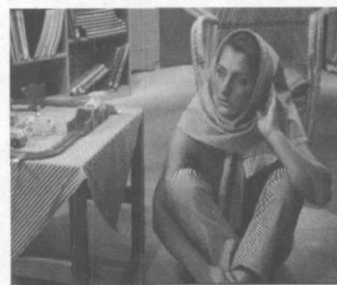
下面通过实验来验证本文算法的有效性. 以 Barbara 为原始图像. 采用 Coifman  $L=2$  小波, 进行3层分解. 随机生成1000个二值混沌序列 $W$ , 以 $W_{500}$ 为嵌入水印. 水印嵌入到 $HL$ 和 $LH$ 子带中. 下面讨论算法的稳健性和不可见性.

### 6.1 不可见性

如图4所示. (a)为原始图像. (b)为嵌入水印后的图像, 此时峰值信噪比 $PSNR=39.27$ , 很难看出水印的存在. (c)为检测结果. 检测阈值(虚线) $T=0.3279$ , 检测峰值 $z=2.143$ .

### 6.2 JPEG 压缩攻击

JPEG是目前最常用的图像压缩格式, 水印算法应对JPEG压缩攻击具有足够的稳健性. 质量因子 $Q=15$ 时的水印图像如图5所示.  $PSNR=34.38$ . 可以看出, 图像质量已经下降.  $T=0.1756$ ,  $z=0.4494$ , 能够检测出较强的水印信号.



(a)



(b)

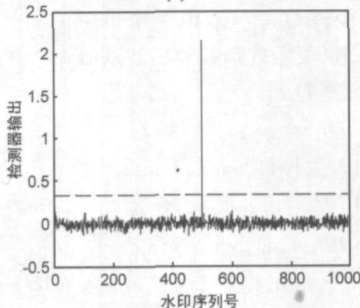
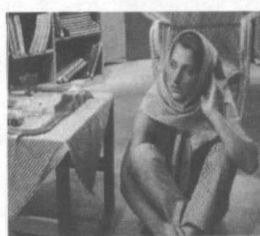
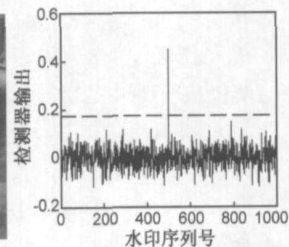


图4 (a)原始图像; (b)水印图像; (c)检测结果



(a)



(b)

图5 (a)JPEG压缩后的水印图像; (b)检测结果

### 6.3 高斯噪声攻击和椒盐噪声攻击

图6和图7示出了算法的抗噪能力, 图6是受到均值为0, 方差为0.1的高斯噪声干扰后的水印图像. 图像的视觉效果很差,  $PSNR=28.28$ .  $T=0.4668$ ,  $z=1.549$ , 水印能被检测出来.

图7是受到强度为0.1的椒盐噪声干扰后的水印图像, 图像的质量变得很差,  $PSNR=29.89$ .  $T=0.3736$ ,  $z=1.865$ , 水印能被检测出来.

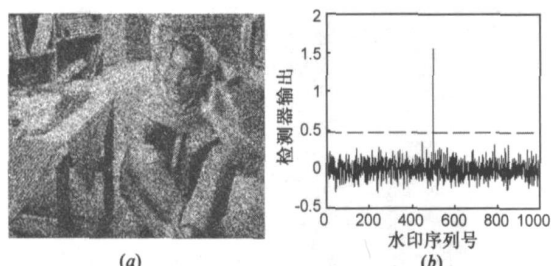


图 6 (a) 高斯噪声干扰后的水印图像; (b) 检测结果

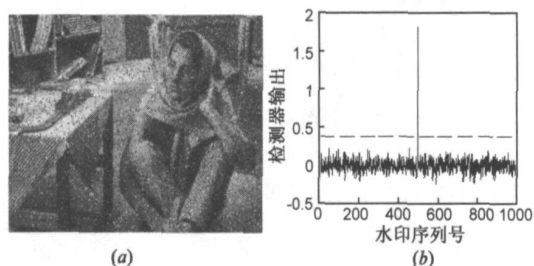


图 7 (a) 椒盐噪声干扰后的水印图像; (b) 检测结果

#### 6.4 剪切攻击

图 8 示出了将水印图像剪切掉 3/4 后的情况。PSNR = 23.35,  $T = 0.1256$ ,  $z = 0.6045$ , 水印能被检测出来。水印图像被剪切的越多, 水印含量就越小, 检测峰值也就越低。

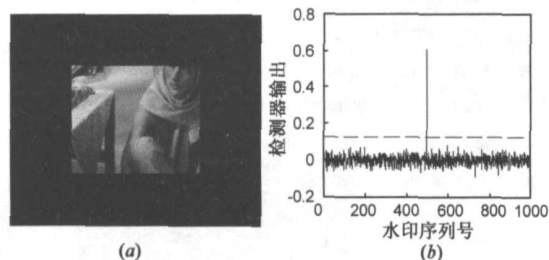


图 8 (a) 剪切后的水印图像; (b) 检测结果

## 7 结论

本文提出了一种基于图像属性的 Coifman 小波域数字水印算法。实验证明, 在具有相同支集宽度的情况下, Coifman 小波优于 Daubechies 小波。为了兼顾水印图像的稳健性和不可见性, 引入了 3 个嵌入因子:  $\alpha$ ,  $\beta$  和  $\gamma$ 。根据人眼对图像平滑区、边缘区和纹理区以及感兴趣区的不同感知特性和感兴趣程度, 对嵌入的水印强度进行适当的修改, 可以提高水印的稳健性和降低视觉失真。实验证明了本文算法的有效性。

#### 参考文献:

- [1] I J Cox, et al. Secure spread spectrum watermarking for multimedia[J]. IEEE Trans Image Processing, 1997, 6(12): 1673–1687.
- [2] I J Cox, et al. Digital Watermarking[M]. San Francisco: Morgan Kaufmann, 2002.
- [3] N Jayant. Signal compression based on models of human perception[J]. Proceeding of IEEE, 1993, 81(10): 1385–1422.

- [4] X Ran, et al. A perceptually motivated three component image model part I: description of the model[J]. IEEE Trans Image Processing, 1995, 4(4): 401–415.
- [5] M G Ramos, et al. Psychovisually – based multiresolution images segmentation [A]. Proc of IEEE Int Conf Image Processing'97[C]. Santa Barbara, IEEE, 1997, 66–69.
- [6] 张旗, 等. 面向图像压缩的图像分类及压缩结果预测[J]. 中国图象图形学报, 2003, 8A(4): 409–414.
- Zhang Qi, et al. Image classification for image compression and compression result forecast[J]. Journal of Image and Graphics, 2003, 8A(4): 409–414. (in Chinese)
- [7] C M Priviter, et al. Algorithms for defining visual regions of interest: comparison with eye fixations[J]. IEEE Trans Patt Anal Machine Intell, 2000, 22(9): 970–982.
- [8] 陈强, 等. 基于感兴趣区的 MPEG-4 FGS 增强层码率分配算法[J], 电子与信息学报, 2003, 27(3): 402–406.
- Chen Qiang, et al. ROF based rate allocation algorithm for MPEG-4 FGS[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2005, 27(3): 402–406. (in Chinese)
- [9] I Daubechies. Orthonormal bases of compactly supported wavelets II: variations on a theme[J]. SIAM J Math Anal, 1993, 24(3): 499–519.
- [10] C T Hsu, et al. Hidden digital watermarks in images[J]. IEEE Trans Image Processing, 1999, 8(1): 58–68.
- [11] J C Yen. Watermark embedded in permuted domain[J]. Electronic Letters, 2001, 37(2): 80–81.
- [12] 余燕忠, 等. 基于信噪比的自适应图像水印算法[J]. 计算机工程, 2003, 29(1): 70–71.
- Yu Yan zhong, et al. An algorithm of adaptive image watermarking based on SNR[J]. Computer Eng, 2003, 29(1): 70–71. (in Chinese)
- [13] M Bami, et al. A DCT domain system for robust image watermarking[J]. Signal Processing, 1998, 66: 357–372.
- [14] A Nikolaidis, et al. Asymptotically optimal detection for additive watermarking in the DCT and DWT domain[J]. IEEE Trans Image Processing, 2003, 12(5): 536–571.

#### 作者简介:



王 演 男, 1974 年生, 1996 年毕业于大连海事大学通信工程专业, 并获学士学位。现为大连海事大学通信与信息系统专业博士研究生, 主要研究方向为信号和图像处理、小波分析。  
E-mail: dlmuwangyan@sohu.com

梁德群 男, 1940 年出生, 教授, 博士生导师。1966 年毕业于西安交通大学工业企业电气化与自动化专业。主要从事图象处理和模式识别的研究。目前主要研究方向是低级视觉、并行结构和图象检测。

E-mail: lld40@sohu.com