

面向移动计算的数字水印技术研究

黄向生¹ 杨小帆² 王阳生¹

(中国科学院自动化所模式识别国家重点实验室 北京100080)¹ (重庆大学计算机学院 重庆400044)²

The Research on Watermarking for Mobile Computing

HUANG Xiang-Sheng¹ YANG Xiao-Fan² WANG Yang-Sheng¹

(National Laboratory of Pattern Recognition, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)¹

(College of Computer Science, Chongqing University, Chongqing 400044)²

Abstract In the mobile computing environment, we propose a novel watermarking algorithm based on integer wavelet through pixel-wise masking with simple human visual system (HVS). Then the correlation between the watermarking sequence and the marked DWT coefficients coded with difference refinement is discussed. Finally, watermarking detection algorithm is presented for scalable coding.

Keywords Watermarking, Integer wavelet transform, Scalable coding

1 引言

随着无线互连的不断发展,移动设备的使用越来越普遍,在移动设备上开发的服务项目更是日益丰富。以前移动设备只能提供文本服务,例如短信息;如今多媒体服务的不断涌现,极大地丰富了人们的生活,同时也把多媒体数据保护问题带到无线互连中。与固有网相比,移动计算普遍具有以下特点^[10]:1)移动设备存储容量小,计算能力弱;这就要求数字多媒体保护不能占用太多的计算资源,即计算速度要快,需要的辅助存储空间要小。2)无线传输的带宽窄,在网络拥挤的情况下,只能传输最重要的多媒体数据;因此要求多媒体数据保护必须支持渐进式编码(Scalable Coding)。3)移动设备能量储备少,由于计算量与功耗成正比,因此要求多媒体数据保护技术的计算复杂性尽可能低。

传统的加密方法对数据的保护具有很大的局限性,而新兴的数字水印技术则弥补了这些缺陷。10多年来,数字水印技术得到了充分的发展。目前水印嵌入方式有两种:1)在空间域嵌入水印;2)在变换域嵌入水印。同时,由于小波技术的不断成熟,基于小波变换的数字水印技术也得到广泛的研究。文[1]提出了一种基于小波变换的水印嵌入方法,而文[3]为了提高精确度将整数小波引入到水印技术上。与此同时,人们对视觉模型也做了相当多的研究^[1,4-6]。但是,这些数字水印技术都是在固有网络计算环境下进行的研究;并且这些方案都需要大量的运算,不适合于移动计算环境。加州大学的 Su 提出数字水印技术应该与当前的多媒体压缩技术相结合^[2],例如与 JPEG2000 编码相融合,即支持渐进式编码。但从其嵌入水印和检测水印的算法来看,并没有很好地解决支持渐进式编码的要求,第一、他只有一些大于某一阈值的小波系数上加统一大小的水印,这很容易导致图像视觉效果不好;第二、水印检测时,对各种精细度的编码都采用同一个阈值(Threshold)进行水印检测,由于只有一个位平面被编码所带的水印强度和有八个位平面被编码所带的水印强度不一样,

因此他的这种检测方式很难正确判断有无水印。

针对移动计算的特点,本文将视觉模型进行简化,提出一种基于整数小波变换的逐像素点嵌入水印算法,并分析在各种精细度编码下的图像与水印的相关性,提出一种支持渐进式编码的水印检测方案。

2 嵌入水印

随着移动计算的不断发展,越来越多的多媒体应用出现在移动设备上,这极大地丰富了人们的生活,同时也给多媒体数据保护提出了新的要求,即要适应移动计算的计算能力低、存储空间有限等特点。移动环境中的多媒体服务有很多,例如音频、视频、图像等。限于篇幅,本文只讨论图像。

本文采用逐像素嵌入水印的算法。在图像变换域逐像素点嵌入水印算法中,计算量主要在于对图像进行变换和视觉模型的计算,尤其是逐像素点视觉模型的计算,因此,必须尽量减少这两个部分的计算量。

在图像变换方面,本文选用文[7]中的 S+P 整数小波变换。与浮点小波运算相比,整数小波变换速度要快得多。另外,由于大多数的整数小波的乘除运算都是涉及2的整数倍,因此可以将乘除运算转化为移位运算,这样还可以大大提高运算速度。本文在 Compaq iPAQ H3600 系列的 Pocket PC (机型 PE2030) 上做实验,结果表明,对同一幅图像进行变换, Daubechies 9/7 小波的运行时间约为 S+P 整数小波变换的 23 倍。

将图像进行四级整数小波变换,用 l^j 表示各级小波分解下的各个子带,其中 l 表示小波分解级数 $l=0,1,2,3$ 而 θ 表示子带方向 $\theta=0,1,2,3$,如图1所示。

在视觉模型方面,本文简化为只考虑频率大小,而不考虑亮度和纹理等其他因素。在图像变化剧烈的地方多加水印,图像变化平缓的地方少加水印的办法,使得图像既具有一定的水印,又不影响视觉效果。

黄向生 博士研究生,研究方向为小波、数字水印、多媒体压缩。杨小帆 教授,研究方向为图论、数字水印、小波及应用、图像处理。王阳生 研究员,博导,研究方向为计算机视觉。

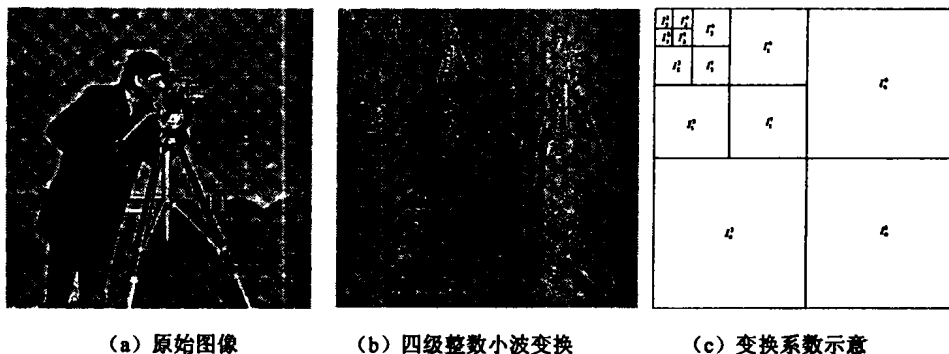


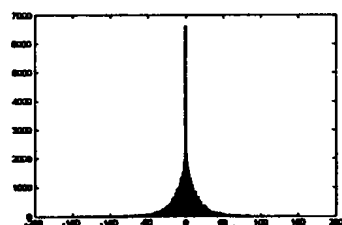
图1 图像四级小波变换

本文采用的水印是一个伪随机二值序列 m_k , 其均值为零。将水印嵌入到图像之前, 先把一维伪随机序列 $m_k \in \{+1, -1\}$ 转化为二维随机矩阵 $r_l^q(i, j)$ 。

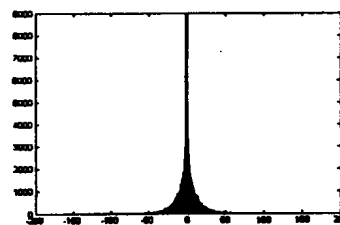
本文除了低频 L 没有嵌入水印外, 其他的各个子带都相应嵌入水印。这是由于不同移动设备对图像的分辨率要求不同, 即要求水印支持图像伸缩, 如果水印只加在最高频处, 那么当图像被缩小时, 就有可能抹掉大量水印信息, 而导致水印无法正确检测。

本文水印嵌入方法如下:

$$I_l^q(i, j) = I_l^q(i, j) + \alpha |I_l^q(i, j)| r_l^q(i, j) \quad (1)$$



(a) Lena 四级小波变换的系数直方图



(b) Camera 四级小波变换的系数直方图

图2 小波系数直方图

分布函数为:

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx \quad (3)$$

由于本文采用整数小波变换, 因此小波系数是离散的随机变量, 其均值为零。图2为小波变换后的系数的直方图。

3.2 相关性计算

本文所采用的水印检测算法不需要参照原图像。水印图像离散整数小波变换系数与水印的相关性可以通过如下计算:

$$\rho = \frac{\sum_{l=0}^3 \sum_{\theta=0}^3 \sum_{i=0}^{(2^{-l}M-1)} \sum_{j=0}^{(2^{-l}N-1)} [I_{l,\theta}^q(i, j) r_l^q(i, j)]}{\sum_{l=0}^3 \sum_{\theta=0}^3 \sum_{i=0}^{(2^{-l}M-1)} \sum_{j=0}^{(2^{-l}N-1)} \alpha |I_{l,\theta}^q(i, j)|} \quad (4)$$

其中, 分母为归一化因子, 而图像的大小为 $2M \times 2N$ 。由于渐进编码是逐位平面进行的, 当网络拥挤时, 只能将几个最重要的位平面先传送到接收端。因此, 每个像素点值是由被传送的那几个位平面构成的, 所以计算表达式应该为:

$$\rho = \frac{\sum_{l=0}^3 \sum_{\theta=0}^3 \sum_{i=0}^{(2^{-l}M-1)} \sum_{j=0}^{(2^{-l}N-1)} [I_{l,\theta}^q(i, j) r_l^q(i, j)]}{\sum_{l=0}^3 \sum_{\theta=0}^3 \sum_{i=0}^{(2^{-l}M-1)} \sum_{j=0}^{(2^{-l}N-1)} \alpha |I_{l,\theta}^q(i, j)|} \quad (5)$$

其中, $I_{l,\theta}^q(i, j)$ 表示水印图像只含有前面 p 个位平面时像素

其中, $l=0, 1, 2, 3; \theta=0, 1, 2, 3; \alpha$ 为水印的强度因子。

3. 检测水印

3.1 小波变换系数分布

由于在分析阈值设定时, 经常要用到图像变换后的系数分布情况, 因此, 下面先对小波系数分布做一个简单的讨论。小波变换后的系数近似满足正态分布^[8,9], 因此, 可以假设小波系数密度函数为:

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (2)$$

点 (i, j) 值大小。然后将 ρ 与一个阈值 T_ρ 相比较, 如果 ρ 大于该阈值, 则认为图像是含有该水印的; 否则, 就认为图像不含有该水印。下面分析在各种精细度编码下的阈值设定。

3.3 阈值设定

在确定阈值大小时, 本文同时考虑两种错误概率的优化, 即“弃真”和“纳伪”的两类错误; 并将“弃真”称为第一类错误, “纳伪”称为第二类错误。那么, 对于一个给定的图像和一个水印序列, 只存在以下三种可能:

情况一: 图像没有嵌入任何水印;

情况二: 图像嵌的是另外一个水印序列, 而不是该水印序列;

情况三: 图像嵌的正是该水印序列。

为了更好地使用决策论, 我们做一些切合实际的假设: 一、水印序列是一个均值为零的二值随机变量, 而且独立于图像的小波系数; 二、 $I_{l,\theta}^q(i, j)$ 是一个独立的均值为零的随机变量, 而且 $I_{l,\theta}^q(i, j)$ 的各个位平面的像素值也是均值为零的随机变量, 并独立于水印; 三、根据中心极限定理, 本文假设 ρ 满足正态分布。根据以上假设, 上述的三种情况下 ρ 的平均值分别为:

$$\text{情况一: } \mu_{\rho 1} = 0 \quad (6)$$

$$\text{情况二: } \mu_{\rho 2} = 0 \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{情况三: } \mu_{p3} = E(\rho_3) &= E\left\{ \frac{\sum_{i=0}^3 \sum_{\theta=0}^2 \sum_{j=0}^{(2^{-l}M-1)(2^{-l}N-1)} [I_{l,p}^{\theta}(i,j) r_l^{\theta}(i,j)]}{\sum_{i=0}^3 \sum_{\theta=0}^2 \sum_{j=0}^{(2^{-l}M-1)(2^{-l}N-1)} \alpha |I_{l,p}^{\theta}(i,j)|} \right\} \\ &= E\left\{ \frac{\sum_{n=1}^p \sum_{i=0}^3 \sum_{\theta=0}^2 \sum_{j=0}^{(2^{-l}M-1)(2^{-l}N-1)} [(2^{8-n} \cdot s(I_{l,p}^{\theta}(i,j))) \cdot (P_{l,p}^{\theta}(i,j) + c_{l,p}^{\theta}(i,j))] \cdot r_l^{\theta}(i,j)]}{\sum_{n=1}^p \sum_{i=0}^3 \sum_{\theta=0}^2 \sum_{j=0}^{(2^{-l}M-1)(2^{-l}N-1)} \alpha [(2^{8-n} \cdot s(I_{l,p}^{\theta}(i,j))) \cdot (P_{l,p}^{\theta}(i,j) + c_{l,p}^{\theta}(i,j))] } \right\} \end{aligned}$$

其中, $s(I_{l,p}^{\theta}(i,j)) \in \{+1, -1\}$ 是 $I_{l,p}^{\theta}(i,j)$ 的符号, $P_{l,p}^{\theta}(i,j) \in (0,1)$ 表示原图像小波系数第 l 级小波变换的方向为 θ 坐标为 (i,j) 第 p 个位平面的值, $c_{l,p}^{\theta}(i,j) \in \{+1, -1\}$ 是由于加入

水印而引起的变化,即如果原位平面上的值为1,加入水印变为0,那么 $c_{l,p}^{\theta}(i,j) = -1$;相反, $c_{l,p}^{\theta}(i,j) = 1$,那么均值为:

$$\begin{aligned} \mu_{p3} = E(\rho_3) &= E\left\{ \frac{\sum_{n=1}^p \sum_{i=0}^3 \sum_{\theta=0}^2 \sum_{j=0}^{(2^{-l}M-1)(2^{-l}N-1)} [2^{8-n} \cdot s(I_{l,p}^{\theta}(i,j)) \cdot c_{l,p}^{\theta}(i,j) r_l^{\theta}(i,j)]}{\sum_{n=1}^p \sum_{i=0}^3 \sum_{\theta=0}^2 \sum_{j=0}^{(2^{-l}M-1)(2^{-l}N-1)} \alpha [2^{8-n} \cdot s(I_{l,p}^{\theta}(i,j)) \cdot (P_{l,p}^{\theta}(i,j) + c_{l,p}^{\theta}(i,j))] } \right\} \\ &= \frac{1}{\alpha} \cdot E\left\{ \frac{\sum_{n=1}^p \{ \sum_{b \in S_n^+} [2^{8-n} \cdot \Phi(b)] - \sum_{b \in S_n^-} [2^{8-n} \cdot \Phi(b)] \}}{\sum_{n=1}^p \{ \sum_{b \in D_n^1} [2^{8-n} \cdot \Phi(b)] \}} \right\} \quad (8) \end{aligned}$$

其中, S_n^+ 是那些能使 $s(I_{l,p}^{\theta}(i,j))$, $c_{l,p}^{\theta}(i,j)$ 和 $r_l^{\theta}(i,j)$ 三个数相乘为正的小波系数的集合; S_n^- 是那些能使 $s(I_{l,p}^{\theta}(i,j))$, $c_{l,p}^{\theta}(i,j)$ 与 $r_l^{\theta}(i,j)$ 三个数相乘为负的小波系数的集合。当 α 给定时,而 $s(I_{l,p}^{\theta}(i,j))$, $r_l^{\theta}(i,j)$ 与 $c_{l,p}^{\theta}(i,j)$ 各种组合情况的小波系数的集合也是可以确定的。同样地,当 α 给定时, $s(I_{l,p}^{\theta}(i,j))$ 和 $r_l^{\theta}(i,j)$ 的组合情况也是确定的。 D_n^1 是表示加入水印后图像在第 n 位平面值为1的系数的集合。 $\varphi(b)$ 表示像素值大小为 b 的概率。

由于 S_n^+ , S_n^- 和 D_n^1 是不依赖于任何图像数据的,根据二进制的性质就可以确定这三个集合,而且对于各个图像来说,小波系数的分布也是比较稳定,因此, μ_{p3} 的计算只是位平面个数 p 和水印强度 α 的函数。表1是做1000个水印后的统计结果,从上面的分析可以看出,当 $\alpha < 1$ 时,一个位平面的小波系数与水印的相关性比八个位平面的小波系数与水印的相关性大。

在上述三种情况下, ρ 的方差计算如下:

$$\begin{aligned} \sigma_{p1}^2 &= E[(\rho_1 - \mu_{p1})^2] \\ &= E\left\{ \left(\frac{\sum_{i=0}^3 \sum_{\theta=0}^2 \sum_{j=0}^{(2^{-l}M-1)(2^{-l}N-1)} [I_{l,p}^{\theta}(i,j) r_l^{\theta}(i,j)]}{\sum_{i=0}^3 \sum_{\theta=0}^2 \sum_{j=0}^{(2^{-l}M-1)(2^{-l}N-1)} \alpha |I_{l,p}^{\theta}(i,j)|} \right)^2 \right\} \quad (9) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{p2}^2 &= E[(\rho_2 - \mu_{p2})^2] \\ &= E\left\{ \left(\frac{\sum_{i=0}^3 \sum_{\theta=0}^2 \sum_{j=0}^{(2^{-l}M-1)(2^{-l}N-1)} [I_{l,p}^{\theta}(i,j) r_l^{\theta}(i,j)]}{\sum_{i=0}^3 \sum_{\theta=0}^2 \sum_{j=0}^{(2^{-l}M-1)(2^{-l}N-1)} \alpha |I_{l,p}^{\theta}(i,j)|} \right)^2 \right\} \quad (10) \end{aligned}$$

显然 $\sigma_{p2}^2 \geq \sigma_{p1}^2$, 方差越大,引起将没有该水印判断为有的第二类错误的概率 $p_{f2} = \text{Prob}\{\rho > T_p | \text{情况一, 情况二}\}$ 就越大。因此,我们可以只计算 σ_{p2}^2 , 并将其化简如下:

$$\begin{aligned} \sigma_{p2}^2 &\approx \frac{\sigma_r^2}{\alpha^2} E\left\{ \left(\frac{\sum_{i=0}^3 \sum_{\theta=0}^2 \sum_{j=0}^{(2^{-l}M-1)(2^{-l}N-1)} I_{l,p}^{\theta}(i,j)}{\sum_{i=0}^3 \sum_{\theta=0}^2 \sum_{j=0}^{(2^{-l}M-1)(2^{-l}N-1)} |I_{l,p}^{\theta}(i,j)|} \right)^2 \right\} \\ &= \frac{\sigma_r^2}{\alpha^2} \cdot E\left\{ \left(\frac{\sum_{n=1}^p [\sum_{b \in B_n^1} \Phi(b) - \sum_{b \in B_n^{-1}} \Phi(b)]}{\sum_{n=1}^p \sum_{b \in D_n^1} \Phi(b)} \right)^2 \right\} \quad (11) \end{aligned}$$

其中, B_n^1 是表示嵌入水印后,像素点值为正,且第 n 位平面为1的小波系数的集合, B_n^{-1} 是表示嵌入水印后,像素点为负,且第 n 位平面为1的小波系数的集合。

表1 在各种位平面个数下 ρ_3 的均值和方差

位平面个数	1	2	3	4	5	6	7	8
$\alpha \cdot \mu_{p3}$	0.8536	0.4800	0.3769	0.3249	0.2825	0.2661	0.2482	0.2376
$\alpha \cdot \sigma_{p3}$	0.0722	0.0353	0.0235	0.0189	0.0158	0.0147	0.0129	0.0129

表2 在各种位平面个数下, ρ_2 的方差

位平面个数	1	2	3	4	5	6	7	8
$\alpha \cdot \sigma_{p2}$	0.1057	0.0447	0.0308	0.0256	0.0210	0.0196	0.0178	0.0170

从式(10)容易看出, $\sigma_r^2 = 1$, 上述两种方差的计算只需要知道小波系数分布、水印强度系数 α 的大小和位平面个数 p 。由于小波系数分布比较稳定,可以认为是已知条件;水印强度系数 α 也是已知的。表2是做1000个 ρ_2 实验的统计结果。上述

的分析表明,水印的检测不需要知道原始图像的任何信息。这给水印检测带来很大的方便。 σ_{p3}^2 的公式推导与 σ_{p2}^2 类似,表1的第二行是做1000个 σ_{p3}^2 统计的结果。

第一类错误的概率是 $p_{f1} = \text{Prob}\{\rho < T_p | \text{情况三}\}$, 最后本

文假定 $p_{r1} < 10^{-8}$, 而且 $p_{r2} < 10^{-8}$. 根据中心极限定理, ρ 满足正态分布. 那么, 容易求得 T_p 的取值范围. 表3是各种位平面

个数下的 T_p 的取值. 在实际应用中也可以取表3第二行的值.

表3

位平面数	1	2	3	4	5	6	7	8
$\alpha \cdot T_p$	0.4196—0.6124	0.1775—0.3398	0.1223—0.2836	0.1016—0.2498	0.0833—0.2197	0.0778—0.2077	0.0707—0.1969	0.0675—0.1864
$\alpha \cdot T_{实际}$	0.5	0.25	0.2	0.175	0.166	0.143	0.134	0.125

4. 实验

本文针对移动计算环境的特点, 分别对各种精细度编码图像、图像剪切、图像伸缩做了三组实验. 每一组实验都随机产生1000个水印, 并且其中第500个水印嵌入到图像中, 然后用这1000个水印与水印图像的小波系数求相关性, 并将所求的相关性值绘制成曲线. 第一组实验用1000个不同的水印在各种精细度编码条件下做水印检测, 从附录一可以看出, 在任

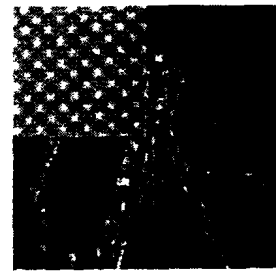
何精细度编码下, 有无水印具有明显的差别, 但值得注意的是, 不同的精细度下, 不能采用相同的阈值. 第二组实验将水印图像剪切掉四分之一, 实验结果表明, 剪掉四分之一后的各种精细度编码水印图像可以被正确检测. 第三组实验是将水印图像通过下采样变为原图像分辨率的四分之一, 缩小后的水印图像在各种精细度编码下, 水印可以被正确检测. 图3是三组实验的部分结果.



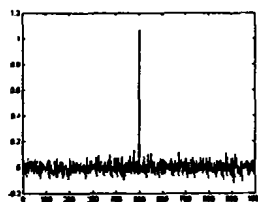
(a) 完全编码水印图像



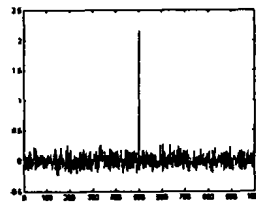
(b) 两个位平面水印图像



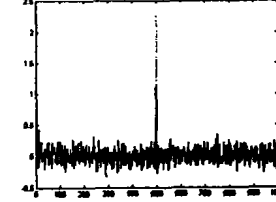
(c) 四分之三图像两个位平面



(d) 与 (a) 相应的水印



(e) 与 (b) 相应的水印



(f) 与 (c) 相应的水印

图3 水印检测

结论 本文针对移动计算的特点, 即计算能力低、带宽窄等, 简化视觉模型, 提出一种基于整数小波变换的逐像素点嵌入水印的算法, 并分析在各种精细度编码条件下的检测方法. 分析与实验结果都表明, 本文采用的算法, 计算速度快, 支持渐进式编码. 在各种精细度编码的条件下, 该水印嵌入算法和检测算法能正确判断水印的存在性; 值得注意的是, 编码的精细度不同, 检测水印的阈值也不同. 在小波系数分布给定的情况下, 这个阈值仅仅与编码的位平面个数和水印强度有关, 无需知道原图像的任何信息. 本文对水印检测的分析都是建立在小波系数分布给定的情况下进行的, 并没有对小波系数分布做深入的研究和分析, 为了能使该水印算法更实用, 今后将在小波系数分布方面做更深入的研究.

参考文献

- 1 Barni M, Bartolini F, Piva A. Improved Wavelet-Based Watermarking Through Pixel-Wise. IEEE Trans on image processing, 2001, 10(5): 783~791
- 2 Su P-C, Wang H-J M, Kuo C-C J. Digital Watermarking on EBCOT Compressed Image. SPIE's 44th Annual Meeting Applications of Digital Image Processing XXII (SD41), Denver,

Colorado, July 1999

- 3 华先胜, 石青云. 多类水印的同时嵌入. 北京大学学报(自然科学版), 2001, 37(3)
- 4 李华. 基于视觉特性和小波分解的水印隐藏方法. 通信学报, 2000, 21(6)
- 5 Osberger W, Maeder A J, Mclean D. A Computational Model of The Human Visual System for Image Quality Assessment. In: proc. DICTA-97, Auckland, New Zealand, Dec. 1997. 337~342
- 6 Osberger W, Maeder A J, Mclean D. A Technique for Image Quality Assment Based on A Human Visual System Model
- 7 Calderbank A R, Daubechies I, Sweldens W, et al. Wavelet Transforms that Map Integers to Integers. Applied and Computational Harmonics Analysis, 1998, 5: 332~369
- 8 Solbø S, Eltoft T. Statistical Modeling of Wavelet Transformed Sar Images
- 9 Vetterli M, Kovacevic J. Wavelets and Subband Coding. Prentice Hall, 1995
- 10 Yang Fan, Zhang Qian, Zhu Wenwu, Zhang Ya-Qin. An Efficient Transport Scheme for Multimedia over Wireless Internet. www.microsoft.com/research/asia