

基于小波域 HMM 模型的稳健多比特图像水印算法*

张荣跃, 倪江群⁺, 黄继武

(中山大学 电子与通信工程系, 广东 广州 510275)

A Robust Multi-Bits Image Watermarking Algorithm Based on HMM in Wavelet Domain

ZHANG Rong-Yue, NI Jiang-Qun⁺, HUANG Ji-Wu

(Department of Electronics and Communication Engineering, SUN YAT-SEN University, Guangzhou 510275, China)

+ Corresponding author: Phn: +86-20-84036167, Email: issjqni@zsu.edu.cn, http://www.zsu.edu.cn

Received 2004-09-20; Accepted 2005-01-07

Zhang RY, Ni JQ, Huang JW. A robust multi-bits image watermarking algorithm based on HMM in wavelet domain. *Journal of Software*, 2005,16(7):1323–1332. DOI: 10.1360/jos161323

Abstract: Robustness is an important issue in the development of multi-bits watermarking algorithm. A new algorithm for robust multi-bits image watermarking based on Hidden Markov Model (HMM) in wavelet domain is proposed. The algorithm is characterized as follows: (1) the proposed blind detector based on vector HMM, which is employed to describe the statistics of wavelet coefficients, achieves significant improvements in performance compared to the conventional correlation detector; (2) an adaptive watermark embedding scheme is applied to achieve the low distortion according to the human visual system; (3) an optimal multi-bit watermark embedding strategy and a maximum-likelihood detection for tree structure of vector HMM are proposed through system robustness analysis. Simulation results show that relatively high capacity for watermark embedding in low frequency subbands of wavelet domain is achieved with the proposed algorithm, and high robust results are observed against Stirmark attacks, such as JPEG compress, adding noise, median cut and filter.

Key words: multi-bits watermark; hidden Markov model (HMM); wavelet; robustness; blind detection

摘要: 稳健性是稳健多比特图像水印的关键问题之一,提出了一种基于小波域隐马尔可夫模型(hidden Markov model,简称 HMM)的多比特图像水印算法,该算法的主要特点为:(1) 利用向量 HMM 模型精确描述图像小波系数间的统计特性,基于此统计模型的水印盲检测系统较之传统的相关检测器,在性能上有显著的提升;(2) 结合视觉掩盖特性,自适应地调整水印嵌入强度,使之在一定的嵌入强度下,视觉主观失真较小;(3) 提出了一种适合隐马尔可夫模型树型结构的多比特数据优化嵌入策略和最大似然检测.数值仿真结果表明,该算法可以较好地利用图像小波域的低频子带以实现较大容量图像水印的嵌入,并在抵抗 Stirmark 平台攻击,如 JPEG 压缩、加噪、

* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant Nos.60133020, 60325208 (国家自然科学基金), the Natural Science Foundation of Guangdong Province of China under Grant No.04205407 (广东省自然科学基金)

作者简介: 张荣跃(1975—),男,浙江金华人,硕士,主要研究领域为多媒体信息安全;倪江群(1963—),男,博士,副教授,主要研究领域为 Wavelet 和 Filter Bank,数字图像/视频信号压缩和水印,数字电视系统,宽带 Internet 技术,嵌入式系统;黄继武(1962—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为多媒体信息安全.

中值滤波和线性滤波等方面具有很强的稳健性.

关键词: 多比特水印;HMM 模型;小波;稳健性;盲检测

中图法分类号: TP309 文献标识码: A

近年来,作为数字多媒体版权保护的新方法,数字水印技术受到了业界的广泛关注^[1].根据 Cox^[2]等人的工作,变换域水印应嵌入到视觉容量较大的低频区域,Huang 等人^[3,4]将水印信号直接嵌入到 DCT 域的 DC 分量或小波域的 LL 子带,以实现水印信号的稳健嵌入.事实上,由于信号小波域 LL 子带容量相对较小,为实现较大容量的水印嵌入,有必要研究基于小波域中低频子带的稳健水印算法.

从数字通信的角度看,水印编码(嵌入)可以理解为在一个宽带信道(原始图像)上用扩频通信技术传输一个窄带信号(水印)^[5-7],尽管水印信号具有一定的能量,但分布到信道中各频率分量上的能量是难以检测到的.由于水印的盲检测相当于在强噪声中检测微弱信号,检测器算法的设计在很大程度上依赖于“信道”的统计模型,即基于宿主载体的统计模型来设计水印检测器.因此,如何准确描述信道(原始图像)统计模型,对提高检测性能至关重要.

当前,基于模型的小波域水印盲检测算法主要基于对小波系数分布的两种假定,即(1) 服从高斯分布(基于变换域的水印算法中采用相关检测器隐含假定变换域系数服从高斯分布,参见文献[8,9]);(2) 服从一般高斯分布(generalized Gaussian distribution),但小波系数间统计独立^[10,11].前一种假定和小波系数的真实分布有较大偏差,而后者却忽略了小波系数间的统计相关性.事实上,信号小波域系数沿尺度(scale)的传播表现出了高度的能量相关性^[12],并且同一尺度不同方向的系数之间也有内在的相关性.小波域向量 HMM 模型可以很好地描述 DWT 系数的真实分布以及系数间的能量相关性,本文提出了一种基于小波域隐马尔可夫模型(HMM)的多比特数字图像水印算法,通过综合应用向量 HMM 模型、视觉自适应掩盖、针对 HMM 树形结构的最优嵌入策略及最大似然检测、信道编码和扩频技术,其水印嵌入和检测机制在对抗 Stirmark 平台攻击(JPEG 压缩、中值滤波、加噪、线性滤波等)具有良好的稳健性和抗攻击能力.

本文第 1 节和第 2 节简单介绍小波域 HMM 模型和基于视觉掩盖的水印自适应嵌入.第 3 节给出针对向量 HMM 树型结构的最优扩展和嵌入策略以及最大似然检测.第 4 节为仿真结果及比较分析.第 5 节给出结论及今后的工作方向.

1 小波域 HMM 模型

Crouse 等人^[12]指出小波变换除了具有局部性、多尺度性和压缩性之外,还具有下列性质:

- 聚集性(clustering):小波变换系数大(小)的地方其周围的小波系数也较大(小).
- 持续性(persistence):在不同的尺度之间,小波系数的大小保持一定的相似性.

充分考虑到信号小波域系数的上述性质,Crouse 等人^[12,13]给出了可以精确描述小波系数的统计模型——小波域 HMM 模型.

1.1 HMM模型及基本概念

在 HMM 模型中,每个小波系数 $w_{j,k}$ ($1 \leq j \leq J$, j 表示层数, $j=1$ 表示能量最高的层)有一种相应的隐状态 $S_{j,k}$,假设有 M 种隐状态,其概率分布为 $P(S_{j,k} = m) = p_{j,k}^{(m)}$; $m=1, \dots, M$. 在隐状态 $S_{j,k} = m$ 确定的条件下,可以认为小波系数 $w_{j,k}$ 服从高斯分布 $g(\mu_{j,k}^{(m)}, \sigma_{j,k}^{(m)})$.实际上,小波系数的均值近似为 0,因此取 $\mu_{j,k}^{(m)} = 0$.同一子带的小波系数服从相同的分布.为简化模型,并不失一般性,本文假定 $M=2$,小波系数 $w_{j,k}$ 的概率分布可记为

$$f_j(w) = p_j^{(1)} g(w; \sigma_j^{(1)}) + p_j^{(2)} g(w; \sigma_j^{(2)}) \quad (1)$$

其中 $p_j^{(1)} + p_j^{(2)} = 1$, $g(w; \sigma)$ 为 0 均值,方差为 σ^2 的高斯分布,即 $g(w; \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{w^2}{2\sigma^2}\right)$.模型(1)中, $p_j^{(1)}$, $p_j^{(2)}$ 表示相应小波系数 $w_{j,k}$ 的能量处于“小”和“大”的概率.

对于小波系数沿 Scale 的能量相关性,HMM 模型以隐状态的马尔可夫链来描述父节点到其 4 个子节点的状态转移概率,记为

$$A_j = \begin{pmatrix} p_j^{1 \rightarrow 1} & p_j^{1 \rightarrow 2} \\ p_j^{2 \rightarrow 1} & p_j^{2 \rightarrow 2} \end{pmatrix}, j = 2, 3, \dots, J \quad (2)$$

其中 $p_j^{m' \rightarrow m}$ 表示父结点隐状态 m' 到子结点隐状态 m 的转移概率.于是,不同尺度之间的隐状态形成马尔可夫链,子结点状态概率分布就可以由父结点状态概率和转移矩阵来计算:

$$p_j^{(m)} = \sum_{m'} p_{j-1}^{(m')} p_j^{m' \rightarrow m}, j = 2, 3, \dots, J \quad (3)$$

若记 $p_j = (p_j^1, p_j^2)$, 则 $p_j = p_{j-1} A_j$, 因此有

$$p_j = p_1 A_2 A_3 \dots A_j, j = 2, 3, \dots, J \quad (4)$$

于是小波域的 HMM 模型可以用下面的参数集来完整地描述:

$$\theta = \{p_1, A_2, \dots, A_J; \sigma_j^{(m)}, (j = 1, \dots, J, m = 1, 2)\} \quad (5)$$

该统计模型可以有效地描述小波系数的统计分布及不同尺度间系数的能量相关性,模型参数的估计可以通过 EM(expectation maximization)算法获得.

在图像处理中,直接采用上述模型相当于假定小波系数在不同方向上是独立的,这种假定忽略了图像信号小波域内在相同尺度不同方向子带系数间实际存在的相关性.为了更好地描述图像小波系数的统计分布,在本文中,我们给出并采用向量 HMM 模型,即把相同位置不同方向的 3 个系数作为一组向量,有 $w_{j,k} = (w_{j,k}^{(1)}, w_{j,k}^{(2)}, w_{j,k}^{(3)})^T$, 如图 1(b)所示,其中 $w_{j,k}^{(1)}, w_{j,k}^{(2)}, w_{j,k}^{(3)}$ 分别表示水平方向、垂直方向、对角方向的小波系数.对于向量 HMM 模型,我们有:

$$f_j(w) = p_j^{(1)} g(w; C_j^{(1)}) + p_j^{(2)} g(w; C_j^{(2)}) \quad (6)$$

这里的 $g(w; C)$ 是 0 均值,协方差矩阵为 C 的多变量高斯概率密度函数,即:

$$g(w; C) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^n |\det(C)|}} \exp(-w^T C^{-1} w) \quad (7)$$

其中 n 为变量的数目,这里, $n=3$, 表示 3 个方向的变量.

同样,在向量 HMM 模型中,小波系数安排成二叉树的结构.父向量结点到子向量结点的转移概率矩阵与标量 HMM 模型相似.向量 HMM 模型的参数集为

$$\theta = \{p_1, A_2, \dots, A_J; C_j^{(m)}, (j = 1, \dots, J, m = 1, 2)\} \quad (8)$$

由于向量 HMM 模型不仅描述了不同 Scale 间的相关特性,还考虑了不同方向小波系数间的相似性,向量 HMM 模型可以更精确地描述小波系数的统计特征.

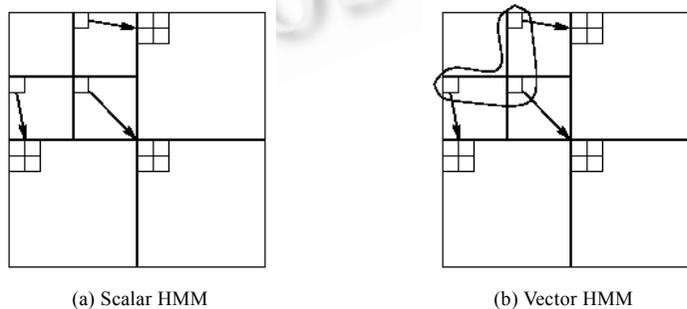


Fig.1 Hidden Markov model (two levels)

图 1 HMM 模型(两层示意图)

1.2 隐马尔可夫模型参数的估计

HMM 的参数集 θ 包括各个子带的均值、方差、初始状态概率和父结点到子结点的转移概率(若有 n 个子带,且子带系数分为 m 个状态,则有 $m \times n$ 个均值、 $m \times n$ 个方差、 m 个初始状态概率和 $(n-1) \times m \times m$ 个转移概率),HMM 参数的估计可由如下 EM 算法^[12]来实现:

- (1) 初始化参数集 $\theta = \theta^0$, 迭代计数器 $l=0$.
- (2) *E* step: 计算隐含状态变量 S 的概率质量函数 $p(S|w, \theta^l)$;
- (3) *M* step: $\theta^{l+1} = \arg \max_{\theta} E[\ln f(w, S|\theta)|w, \theta^l]$;
- (4) $l=l+1$, 如果 θ 收敛, 则退出, 否则跳到第(2)步.

在向量 HMM 模型的参数估计中, 需要把方差的估计改成协方差的估计.

2 小波域视觉模型

由于图像的最终接收者为人, 因此, 充分研究人类视觉系统(HVS), 对于图像信息处理有着非常重要的意义. 研究发现, 人眼具有 3 种掩盖特性: 即亮度掩盖、频率掩盖和纹理掩盖. 隐形图像数字水印的嵌入同时要求稳健性和不可见性, 增强水印的嵌入强度将会增加水印的稳健性, 但过大的嵌入强度又可能破坏水印的不可见性.

采用和 Watson^[14]类似的研究思路, 可以进行自适应水印嵌入, 即通过对图像 DWT 域的 HVS 分析, 产生定量化的 DWT 域视觉掩盖特性, 并将水印嵌入强度限制在 HVS 不可见范围内. 在我们的算法中, 综合考虑了 3 种 DWT 域视觉掩盖特性, 包括(1) HVS 对不同方向、不同层次的中高频子图像中的噪声较为不敏感, 有频率掩盖系数 $frequency_m()$; (2) 对不同亮度区域的噪声的视觉敏感性不同, 对很黑或很亮的区域的噪声不敏感, 有亮度掩盖系数 $luminance_m()$; (3) 对图像纹理区域的噪声不敏感, 有纹理掩盖系数 $texture_m()$. 直接引用 Lewis^[15]等人的结果, 临界可见误差 JND 门限, 取为上述 3 项系数的乘积:

$$JND(j, o, x, y) = frequency_m(j, o) \times luminance_m(j, x, y) \times texture_m(j, x, y)^{0.034} \quad (9)$$

其中

$$frequency_m(j, o) = \begin{cases} \sqrt{2}, & \text{if } o = HH \\ 1, & \text{if } o = \text{other} \end{cases} \times \begin{cases} 0.10, & \text{if } j = 1 \\ 0.16, & \text{if } j = 2 \\ 0.32, & \text{if } j = 3 \\ 1.00, & \text{if } j = 4 \end{cases} \quad (10)$$

$$luminance_m(j, x, y) = 3 + \frac{1}{256} \sum_{u=0}^1 \sum_{v=0}^1 I^{4,LL} \left(u+1 + \frac{x}{2^{j-1}}, v+1 + \frac{y}{2^{j-1}} \right) \quad (11)$$

$$texture_m(j, x, y) = \sum_{k=1}^{j-1} 16^{-k} \sum_o^{HH, HL, LH} \sum_{u=0}^1 \sum_{v=0}^1 \left(I^{j-k,o} \left(u + \frac{x}{2^k}, v + \frac{y}{2^k} \right) \right)^2 + 16^{j-1} \text{var} \left(I^{4,LL} \left(\{1,2\} + \frac{x}{2^{j-1}}, \{1,2\} + \frac{y}{2^{j-1}} \right) \right) \quad (12)$$

3 水印的嵌入及检测

3.1 基于HMM的多比特水印嵌入

如图 2 所示, 基于向量 HMM 的水印嵌入可以分为 3 个基本步骤:

(1) 信息编码: 将要嵌入的水印信息 m 经纠错编码(本文采用 1/3 卷积编码)、直接序列扩频(DSSS)、交织编码(interleaving)和分组后形成分段的嵌入水印信号 W_m , 其中分段的长度 M 表示每棵向量树嵌入的信息比特.

(2) 信息比特的映射和嵌入: 在小波域向量 HMM 模型框架下, 水印信息的嵌入载体为如图 1(b)所示的向量树, 为增强水印抵抗 JPEG 攻击的稳健性, 本文中仅取最低频的 2 层子带, 所组成的向量树共有 15 个结点. 水印的嵌入过程相当于对向量树结点系数的修改过程, 每棵向量树计有 2^{15} 种修改方式或图案(对应于 15 个 '+1' 或 '-1' 的组合而成的图案), 记为 $d = \{d_i; d_i \in \{1, -1\}, i=0, 1, \dots, 14\}$. 如果每棵树只嵌入 M 比特信息 $b = \{b_0, b_1, \dots, b_{M-1}\}$, 令 $L=2^M$, 则集合 $\{b_i\}_{i=1}^L$ 包含了所有 M 比特的信息向量. 一般地, 可以取 $M \leq 15$, 为实现信息比特 b 在向量树中的嵌入,

需通过定义 b 和 d 一一对应,映射 k 将 b 扩展到 15 比特.对于输入 M 比特信息 b_l ,通过映射 k 找到对应的嵌入图案 d_l ,并由式(13)实现向量树结点系数的修改:

$$X(t,i) = X(t,i) + d_l \cdot \beta \cdot a(t,i) \quad (13)$$

其中 $X(t,i)$ 为第 t 棵向量树的第 i 个结点, $\{d_l\}_l$ 为对应 b_l 的映射图案, β 为全局的嵌入强度调整因子,而 $a(t,i)$ 为相应结点的视觉掩盖系数.

(3) 原始图像 $I(x,y)$ 经小波变换,根据信息比特的映射图案修改各向量树结点系数,进行小波反变换得到嵌入水印的图像 $I_w(x,y)$.

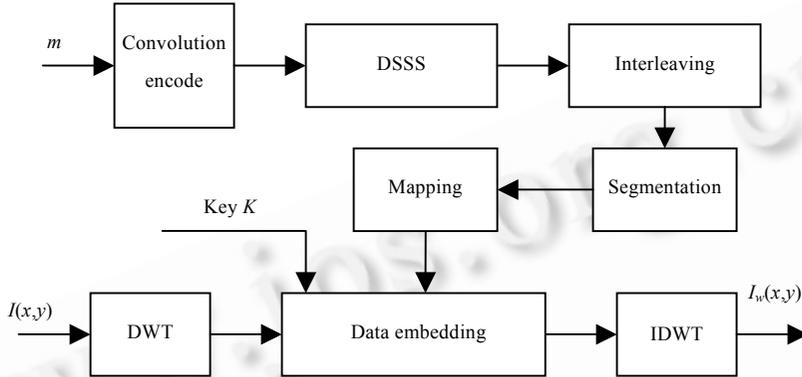


Fig.2 Block diagram of the watermark embedding process

图 2 水印嵌入过程

3.2 极大似然检测算法

在以上基于向量 HMM 的水印嵌入算法中,分段的 M 比特信息 b_l 通过映射 k 扩展成唯一的 15 比特图案 $d_l, l=1,2,\dots,2^M$, 并嵌入到第 t 棵向量树 T_x^t 中.假定图像小波域向量 HMM 模型 θ 已知,则 T_x^t 在此模型下的似然函数为 $f_x(T_x^t | \theta)$,多比特水印信号的最优检测可以表述为以下极大似然检测器^[16],即对于 $l=1,2,\dots,2^M$,检测出的信息向量 b_l 满足式(14):

$$\ln \frac{f_x(T_x^t | b_l)}{f_x(T_x^t | b_m)} > 0, \forall m \neq l \quad (14)$$

考虑到信息向量 b_l 需要扩展为 d_l 以及相应的视觉掩盖效应 $a^l = \{\beta \cdot \alpha(t,i); i=0,1,\dots,14\}$, 式(14)相当于:

$$\ln \frac{f_x(T_x^t - a^l \cdot d_l | \theta)}{f_x(T_x^t - a^l \cdot d_m | \theta)} > 0, \forall m \neq l \quad (15)$$

进一步有:

$$\ln f_x(T_x^t - a^l \cdot d_l | \theta) > \ln f_x(T_x^t - a^l \cdot d_m | \theta), \forall m \neq l \quad (16)$$

式(16)表明,基于向量 HMM 模型的极大似然检测器的输出为具有最大对数似然值的图案 d_l ,由 d_l 可以唯一映射到 M 比特信息 b_l ,检测出所有嵌入的信息 b_l ,并组合成 M ,再进行反交织、解扩频和卷积码译码,得到译码水印信息 \hat{m} .

3.3 系统稳健性分析

从以上的分析可知, M 比特信息 b_l 在嵌入向量树之前需要经映射 k 扩展为图案 d_l ,如何确定映射 k 是优化系统设计的关键问题.本节我们通过水印检测系统的稳健性分析给出确定 k 的几个关键准则.

为简化分析并且不失一般性,我们假定 $M=1$,即每棵树可以嵌入的信息只有 2 种,经映射扩展后的图案分别为 g 和 h .按最大似然准则,如果 $\ln f_x(T_x^t - a^l \cdot g | \theta) > \ln f_x(T_x^t - a^l \cdot h | \theta)$,则有检测器输出 g ;假定我们在第 t 棵中嵌入的是 g ,则检测器输出为 g 的概率 P_g 越大,系统越稳健,这里:

$$P_g = P\{\ln f_x(T_x^t - a^l \cdot g | \theta) > \ln f_x(T_x^t - a^l \cdot h | \theta)\} \quad (17)$$

如果嵌入水印的图像未受攻击,则有:

$$T_z^i = T_x^i + a^i \times g \quad (18)$$

将式(18)代入式(17),有:

$$p_g = P\{\ln f_x(T_x^i | \theta) > \ln f_x(T_x^i + a^i \times (g-h) | \theta)\} \quad (19)$$

式(19)中,如果 g 和 h 距离越大, $a^i \times (g-h)$ 导致 T_x^i 的改变就越多,则 $f_x(T_x^i + a^i \times (g-h) | \theta)$ 越小,检测系统越稳健. g 和 h 的距离可以用码距来测度.在 $M=1$ 的情况下,当 g 和 h 逐位都不同时,码距最大;在 g 和 h 间码距最大时, g 和 h 图案的不同取法对检测系统稳健性的贡献是不同的,我们仅考虑以下 2 种情形:(1) g 每位都取‘1’, h 每位都取‘-1’;(2) g 部分取‘1’,另一部分取‘-1’.而 h 在相应的部位分别取‘-1’和‘1’.

虽然(1)和(2)的图案设计都可以保证 g 和 h 间码距最大,但对 $\hat{T}_x^i = T_x^i + a^i \times (g-h)$ 的影响却有很大不同.对图案(1)设计,相当于向量树每个结点的系数都加上某一值, \hat{T}_x^i 和 T_x^i 近似, $f_x(T_x^i + a^i \times (g-h) | \theta)$ 较大;采用图案(2)设计时,每个结点的系数有增有减, \hat{T}_x^i 和 T_x^i 相差较大, $f_x(T_x^i + a^i \times (g-h) | \theta)$ 取值较小,系统更加稳健.

基于同样的思路,在设计映射图案时,如果可以改变树结构选项中包括根结点或子结点的值,则选择改变根结点的值将具有更强的稳健性,因为改变根结点的值,不但会改变该结点的统计分布,还会通过状态转移矩阵,影响子结点的统计分布.而改变子结点的值,只会改变自己的分布.

以上分析是以 $M=1$ 时的水印检测系统为例,给出了如何设计映射图案以提高系统稳健性的几个基本准则,这些原则在 $M>1$ 时依然有效.

3.4 优化的水印嵌入策略

综合考虑第 3.1 节中的水印嵌入策略和第 3.3 节给出的优化图案映射准则,本节我们将给出基于小波域向量 HMM 模型的多比特水印嵌入算法,主要包括:

A. 水印信息的编码

(1) 对输入 L 比特水印信息 $m = \{m_i; i=1,2,\dots,L, m_i \in [0,1]\}$ 进行卷积编码,得到长度为 L_c 的卷积码 m_c ,本算法采用 1/3 的卷积码编码器,其生成矩阵为

$$G = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(2) 应用长度为 N 的 PN 伪随机序列 $p = \{p_i\}$,对编码信息 $m_c = \{m_{c_i}\}$ 的每一比特 m_{c_i} 进行 DSSS 扩频调制,‘1’调制为 PN 码 P (双极性序列)的正相序列,而‘0’调制为 P 的反相序列,并得到待嵌入的水印数据 w .其中 N 位的 PN 码序列 P 由密钥通过 PN 码发生器产生.

(3) 对 w 进行随机交织编码得到 w_i ,以尽可能地消除在水印检测中产生的突发性差错, w_i 共有 $N \times L_c$ 比特.随机交织的过程如下:在密钥 $K1$ 的控制下,产生 $N \times L_c$ 个 0~1 之间的随机实数,经排序,得到完全打乱的次序 s . w 按 s 的顺序重新排列,完成交织编码,即 $w_i = w[s]$.

(4) 假定每棵向量树嵌入 M 比特,将交织码 w_i 分成 $S = [(N \times L_c + M - 1) / M]$ 段,每段长为 M 比特,其中 $[x]$ 取不大于 x 的最大整数.

B. 分段信息到向量树的最优扩展映射

在我们提出的基于 HMM 水印嵌入算法中,向量树的构造包括 15 个结点,每棵树设计嵌入 M 比特.一般地, M 取值越大,则水印嵌入容量越大,但同时检测算法的计算复杂度也越大,因此 M 的取值必须考虑到水印容量和检测复杂度的折衷.实际中,我们取 $M=5$ 比特,为此需要设计 5~15 比特的扩展映射.根据第 3.3 节给出的最优扩展准则,我们构造了如下映射过程:将待嵌入的 5 比特信息重复 3 次,形成 3 个版本,分别用三角、矩形和圆表示,其中矩形代表的 5 比特信息取反,并按图 3 所示分配到向量树上,形成最优的扩展映射图案,图案中的 15 比特都以双极性 $[1,-1]$ 表示.值得指出的是, M 也可以取其他值,只需根据上述最优扩展准则重新设计 M 到 15 比特的扩展映射.

以上的扩展映射充分考虑到最优扩展原则,3 个根结点对应 3 位不同的信息,充分利用了根结点的信息容

量;每位信息的 3 个版本分散在 3 棵树上,且一个版本与另两个不同,这样使结点系数的改变有增有减.另外,当检测有误时,本质上能降低发生多位错误的概率,因为两个图案之间的码距(不同的位数)越大,检测时发生错误的概率越低,假如两个信息 b_l 和 b_m 之间的码距为 v ,则它们对应图案 d_l, d_m 间的码距为 $3 \times v$,故可以预期上述的映射方法将降低发生多位错误的概率.

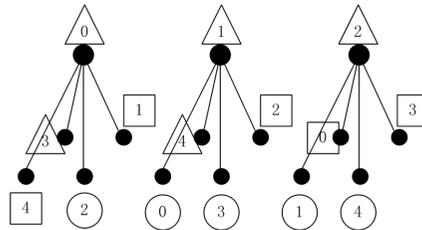


Fig.3 Information mapping

图 3 信息段映射关系图

C. 水印的嵌入

原始图像 $I(x, y)$ 使用 9/7 小波进行 4 次分解,然后在图像小波域最低频的两层子带内组合成 T 棵向量树.经编码的水印信息被分成 S 段,每段 M 比特嵌入到 S 棵向量树中.该 S 棵树由密钥 K 控制,从所有 T 棵树中随机选出.随机选树的作用,一是提高了信息嵌入的隐秘性;二是打乱了顺序,减少了发生连续误码的概率.

每一段 M 比特信息 b_l 对应嵌入在随机选出的向量树上,由 b_l 通过映射找到对应的嵌入图案 d_b ,并按式(13)完成结点系数的修改.

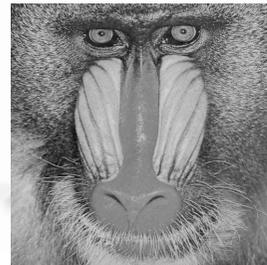
按上述的方法完成全部信息的嵌入,再进行小波反变换,得到嵌入水印的图像 $I_w(x, y)$.

4 实验仿真结果和比较分析

为了验证以上的理论分析,我们进行了充分的仿真实验.实验中采用了多幅具有不同纹理特征的 $512 \times 512 \times 8b$ 标准图像,包括 lena, baboon, fishingboat 和 peppers,实际的版权信息取 $L=60\text{bits}$,图 4 给出了 4 幅基于我们提出的小波域向量 HMM 算法嵌入 60 比特水印的图像.



(a) Lena (42.56dB)



(b) Baboon (42.98dB)



(c) Peppers (42.23dB)



(d) Fishingboat (42.43dB)

Fig.4 Watermarked images

图 4 嵌入水印后的图像

在实验仿真中,我们同时采用传统的相关检测(匹配滤波)算法进行性能对比.需要指出的是,相关检测算法在目前变换域水印算法中有着广泛的应用^[8,9],其基本的假定是信号的变换域系数服从高斯分布.为进行公正的比较,在相关检测时,水印的嵌入采用同样的树形结构和映射图案,嵌入的版权信息同样取 $L=60\text{bits}$.相关检测器可以简单描述如下:如果式(20)成立,则相关检测器检测出在第 t 棵树中嵌入 M 比特信息 b_t .

$$\text{Correlate}(T_z^t|b_t) > \text{Correlate}(T_z^t|b_m), \quad \forall m \neq t \tag{20}$$

其中函数 $\text{Correlate}(T_z^t|b_t)$ 计算嵌入 b_t 信息时的相关值.考虑到在嵌入信息 b_t 时,结点系数的改变量为 $a^t \cdot d_t$,式(20)等价于

$$T_z^t \times (a^t \cdot d_t)' > T_z^t * (a^m \cdot d_m)', \quad \forall m \neq t \tag{21}$$

图5给出了在不同的 JPEG 攻击条件下,根据4幅标准的测试图像,分别采用向量 HMM 和相关检测器的误码性能比较.可以发现,小波域向量 HMM 检测器比较相应的相关检测器在误码性能上有显著的提升.需要说明的是,此时还没有进行卷积/交织译码和解扩操作.

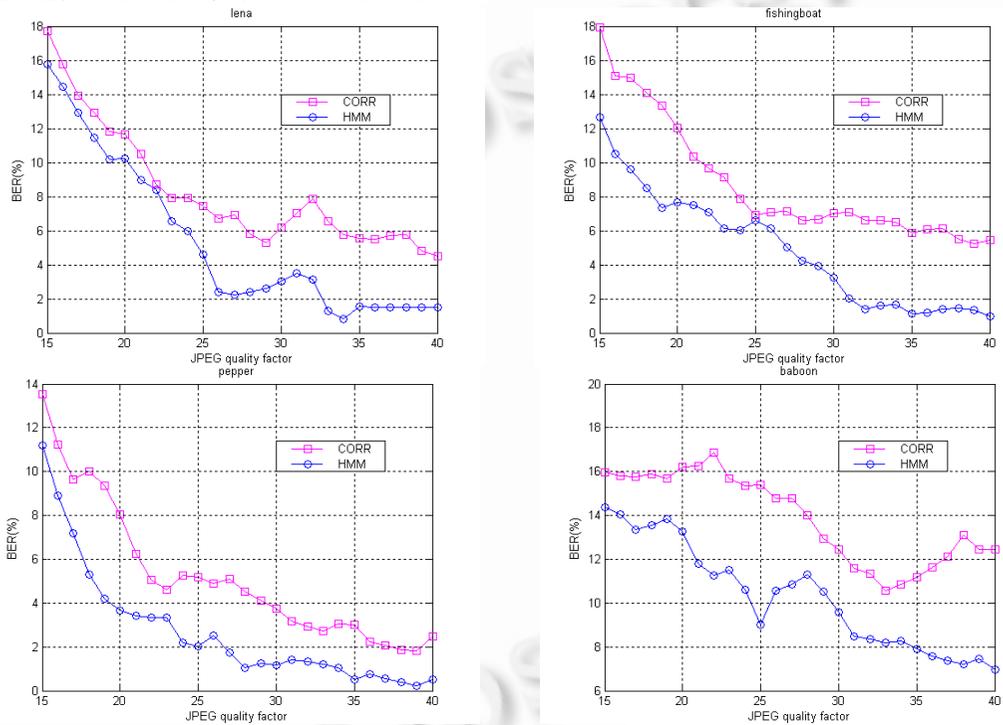


Fig.5 BER values comparison between vector HMM detector and correlation detector

图5 小波域向量 HMM 检测器和相关检测器的误码率比较

表1和表2分别给出了在 Stitmark4.1 平台^[17]攻击下两种检测器的实验结果,实验表明,本文提出的基于小波域向量 HMM 模型的检测器较之传统的相关检测器在抵抗 JPEG 攻击、噪声攻击和抗中值滤波等方面性能有显著的提高.

Table 1 Performance of vector HMM detector

表1 基于向量 HMM 模型的检测器性能

Image	Lena	Baboon	f16	Fishingboat	Peppers
PSNR (dB)	42.56	42.98	42.52	42.43	42.23
JPEG	13~100	11~100	11~100	12~100	11~100
Additive noise	1~3	1~3	1~5	1~3	1~5
MedianCut	7×7	7×7	9×9	7×7	7×7
Gaussian	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok
Sharpening	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok

Table 2 Performance of correlation detector

表 2 相关检测器性能

Image	Lena	Baboon	fl6	Fishingboat	Peppers
PSNR (dB)	42.56	42.98	42.52	42.43	42.23
JPEG	18~100	23~100	17~100	16~100	18~100
Additive noise	1~3	1	1~5	1~2	1~5
MedianCut	5×5	3×3	5×5	5×5	5×5
Gaussian	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok
Sharpening	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok

作为对比分析,图 6 给出了文献[9]中基于不同的变换域水印算法的相关检测结果,测试图像为 Lena,嵌入比特数为 1 比特,在 JPEG 压缩质量因子低于 70 时,几乎所有算法的检测误码率都大于 30%。比较图 6 的结果,我们基于小波域 HMM 模型的水印算法(如图 5 所示)在性能上有显著的提高(嵌入更多比特,误码率更低)。在文献[18]中,Mayer 等人给出了另一种基于 informed coding 技术的多比特水印算法,嵌入的信息量是 70 比特,可以抵抗 JPEG50 以上的攻击;而我们在本文中提出的多比特水印算法,在较低的嵌入强度下(恢复信噪比 42dB 以上),可以抵抗 JPEG13 以上的攻击。

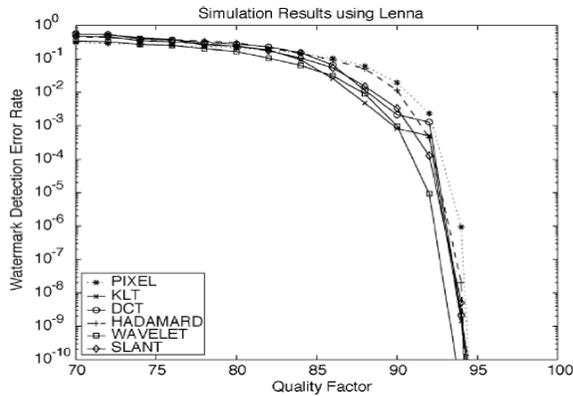


Fig.6 Result of Reference[9]

图 6 文献[9]的结果

5 结论及今后的工作

本文提出了一种基于小波域 HMM 模型的多比特水印算法,在对图像建模的过程中采用了同时考虑不同尺度和同一尺度不同子带间相关性的向量 HMM 模型,以更精确地描述图像小波域的统计行为;通过系统的稳健性分析,本算法给出了针对 HMM 模型树型结构的分段水印信息优化扩展映射策略,并结合视觉特性(HVS)分析完成自适应水印嵌入;同时,该算法还采用卷积编码、DSSS 扩频和交织编码技术,实现了较高容量有意义水印的稳健嵌入。实验仿真结果表明,与传统的相关检测器比较,本算法在抵抗 Stirmark4.1 平台攻击,如 JPEG 压缩、加噪攻击、中值滤波和线性滤波等方面性能有显著的提升。

目前正在进行中的后续工作包括将该算法用于彩色图像水印、Halftone 图像水印、视频水印。另外,如何对抗几何攻击的稳健水印算法,将是另一研究问题。

References:

- [1] Huang J, Tan T. A review of Invisible Image watermarking. ACTA Automatica Sinica, 2000,26(5):646-655 (in Chinese with English abstract).
- [2] Cox JJ, Kilian J, Leighton T, Shamoon T. Secure spread spectrum watermarking for multimedia. IEEE Trans. Image Processing, 1997,6(12):1837-1687.
- [3] Huang J, Shi YQ, Shi Y. Embedding image watermarks in DC components. IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology, 2000,10(6):974-979.

- [4] Huang DR, Liu JF, Huang JW. An embedding strategy and algorithm for image watermarking in DWT domain. *Journal of Software*, 2002,13(7):1290–1297 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/13/1290.pdf>
- [5] Chen B, Wornell GW. An information-theoretic approach to the design of robust digital watermarking systems. In: *Proc. of the 1999 IEEE Int'l Conf. on Acoustics, Speech, and Signal Processing*. 1999. 2061–2064.
- [6] Chou J, Pradhan SS, Ramchandran K. On the duality between distributed source coding and data hiding. In: *Proc. of the 33rd Asilomar Conf. on Signals, Systems and Computers*. 1999. 1503–1507.
- [7] Cox J, Miller ML, McKellips AL. Watermarking as communications with side information. *Proc. of the IEEE*, 1999,87(7): 1127–1141.
- [8] Hernandez JR. DCT-Domain watermarking technique for still image: Detector performance analysis and a new structure. *IEEE Trans. on Image Processing*, 2000,9(1):55–68.
- [9] Fei CH, Kundur D, Kwong RH. Analysis and design of watermarking algorithms for improved resistance to compression. *IEEE Trans. on Image Processing*, 2004,13(2):126–144.
- [10] Cheng Q, Huang TS. Blind digital watermarking for images and videos and performance analysis. In: *Proc. of the Int'l Conf. Multimedia Expos. New York*, 2000. 389–392.
- [11] Cheng Q, Huang TS. An additive approach to transform-domain information hiding and optimum detection structure. *IEEE Trans. Multimedia*, 2001,3(9):273–284.
- [12] Crous MS, Nowak RD, Baraniuk RG. Wavelet-Based statistical signal processing using hidden Markov models. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 1998,46(4):886–902.
- [13] Do MN, Vetterli M. Rotation invariant texture characterization and retrieval using steerable wavelet-domain hidden Markov models. *IEEE Trans. on Multimedia*, 2002,4(4):517–527.
- [14] Watson AB, Yang GY, Solomon JA, Villasenor J. Visibility of wavelet quantization noise. *IEEE Trans. on Image Processing*, 1997,6(8):1164–1175.
- [15] Lewis AS, Knowles G. Image compression using the 2-D wavelet transform. *IEEE Trans. on Image Processing*, 1992,1(2):244–250.
- [16] Van Trees HL. *Detection, Estimation and Modulation Theory*. New York: John Wiley & Sons, 1968.
- [17] Stirmark. <http://www.cl.cam.ac.uk/~fapp2/watermarking/stirmark/>
- [18] Mayer J, Silva RA. Efficient informed embedding of multi-bit watermark. In: *Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Acoustics, Speech, and Signal Processing, ICASSP 2004*. 2004. 389–392.

附中文参考文献:

- [1] 黄继武,谭铁牛. 图像隐形水印综述. *自动化学报*, 2000,26(5):646–655.
- [4] 黄达人,刘九芬,黄继武. 小波变换域图像水印嵌入对策和算法. *软件学报*, 2002,13(7):1290–1297. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/13/1290.pdf>