

其中: $X(N), x(N)$ 均为列向量; $H(N)$ 为 DHT 变换矩阵, 其逆矩阵为其本身.

1.2 DHT 变换矩阵和 DCT 变换矩阵的乘积

令 $M = H(N) \times C(N)$, 其中 $C(N)$ 为一维 DCT 变换矩阵, 则下列 N 个元素相等且在 N 足够大的条件下近似为 0.9, 其他元素近似为 0: N 为偶数时, $M(1, 1), M(i+1, 2^* i), i = 1, 2, \dots, N/2$ 和 $M(N+1-i, 2^* i+1), i = 1, 2, \dots, (N-2)/2$; N 为奇数时, $M(1, 1), M(i+1, 2^* i), i = 1, 2, \dots, (N-1)/2$ 和 $M(N+1-i, 2^* i+1), i = 1, 2, \dots, (N-1)/2$.

下面分析 $M(1, 1) = \frac{\sqrt{2}}{N} (\frac{1}{\sqrt{2}} + \cos \frac{\pi}{2N} + \cos \frac{2\pi}{2N} + \dots + \cos \frac{(N-1)\pi}{2N})$. 根据积分定义,

$$\int_{\frac{\pi}{2N}}^{\frac{\pi}{2}} \cos x dx \leq \sum_{i=1}^{N-1} \frac{\pi}{2N} \cos \frac{i\pi}{2N} \leq \int_0^{\frac{(N-1)\pi}{2N}} \cos x dx,$$

$$\int_a^b \cos x dx = \sin x \Big|_a^b,$$

则有

$$\sum_{i=1}^{N-1} \frac{\pi}{2N} \cos \frac{i\pi}{2N} \approx \int_0^{\frac{(N-1)\pi}{2N}} \cos x dx = \sin \frac{(N-1)\pi}{2N},$$

即 $M(1, 1) \approx \frac{1}{N} + \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \sin \frac{(N-1)\pi}{2N}$. 当 N 趋于无穷时, $M(1, 1)$ 趋于 $\frac{2\sqrt{2}}{\pi} \approx 0.9003$.

$$M(i+1, 2^* i) = \frac{\sqrt{2}}{N} (\frac{1}{\sqrt{2}} + \cos \frac{(4i-1)\pi}{2N} (\cos \frac{2i\pi}{N} + \sin \frac{2i\pi}{N}) + \cos \frac{2(4i-1)\pi}{2N} (\cos \frac{4i\pi}{N} + \sin \frac{4i\pi}{N}) + \dots + \cos \frac{(N-1)(4i-1)\pi}{2N} (\cos \frac{2(N-1)i\pi}{N} + \sin \frac{2(N-1)i\pi}{N})) = \frac{1}{N} + \frac{1}{\sqrt{2}N} (\cos \frac{(8i-1)\pi}{2N} + \cos \frac{\pi}{2N} + \sin \frac{(8i-1)\pi}{2N} + \sin \frac{\pi}{2N} + \cos \frac{2(8i-1)\pi}{2N} + \cos \frac{2\pi}{2N} + \sin \frac{2(8i-1)\pi}{2N} + \sin \frac{2\pi}{2N} + \dots + \cos \frac{(8i-1)(N-1)\pi}{2N} + \cos \frac{(N-1)\pi}{2N} + \sin \frac{(8i-1)(N-1)\pi}{2N} + \sin \frac{(N-1)\pi}{2N}),$$

因为

$$\sin \frac{j\pi}{2N} = \cos \frac{(N-j)\pi}{2N},$$

$$\cos \frac{(8i-1)(N-j)\pi}{2N} = \cos(-\frac{(8i-1)j\pi}{N} - \frac{\pi}{2}) = -\sin \frac{(8i-1)\pi}{2N} \quad j = 1, 2, \dots, N-1,$$

所以

$$M(i+1, 2^* i) = \frac{1}{N} + \frac{\sqrt{2}}{N} (\cos \frac{\pi}{2N} + \cos \frac{2\pi}{2N} + \dots + \cos \frac{(N-1)\pi}{2N}) = M(1, 1) \approx \frac{1}{N} + \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \sin \frac{(N-1)\pi}{2N}.$$

类似分析可得,

$$M(N+1-i, 2^* i+1) = \frac{1}{N} + \frac{\sqrt{2}}{N} (\cos \frac{\pi}{2N} + \cos \frac{2\pi}{2N} + \dots + \cos \frac{(N-1)\pi}{2N}) = M(1, 1) \approx \frac{1}{N} + \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \sin \frac{(N-1)\pi}{2N}.$$

图 1 为一个 35×35 DHT 矩阵乘以 35×35 DCT 矩阵的结果, 红色区域近似为 0, 白色区域近似为 0.9.

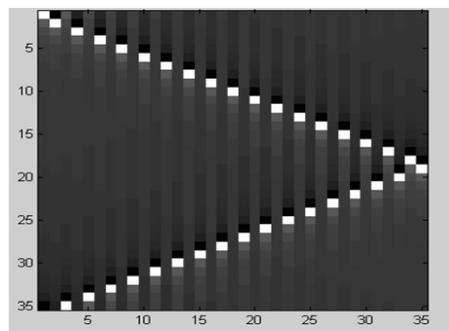


图 1 用 MATLAB 验证 DHT 矩阵和 DCT 矩阵乘积

2 基本原理

图像经过 DCT 变换, 大部分信息被集中到少数低频系数中, 低频系数对图像的质量和视觉效果影响很大, 是人类视觉感觉最重要的位置, 其余的中高频系数视觉敏感度相对较低. DCT 系数的频率高低对应

图像变化快慢, 低频系数部分是图像中变化缓慢的区域, 对应图像的背景和整体, 高频部分对应图像变化快的区域如图像的纹理和跳变等.

最经典的 DCT 水印算法是由 Cox $I J$ 等^[6]提出的一种基于整体 DCT 变换数字水印方案, 该方案首次提出水印应隐藏在视觉最敏感的低频系数上, 其主要原理是低频分量构成图像信号的主要成分, 能量较大, 能容纳较多的信号失真, 该方案稳健性较好. 低频嵌入水印虽然保证了水印的稳健性, 但是由于低频系数是人类感觉最重要的部位, 因此低频的改动会引起原图像的失真. DCT 域的高频带由于抗压缩能力较差, 所以一般不在高频带嵌入水印. Hsu Chion-ting 等^[7]进行了折中, 将水印序列嵌入在 DCT 域的中频系数中, 这样可以平衡水印的稳健性和不可见性.

根据 DHT 和 DCT 矩阵相乘的结论, 对一个图像先进行 DCT 变换再进行 DHT 变换, 相当于将原图像变换成 4 个近似于原图的中心对称图形, 如图 2 所示. 在 DCT 域中取局部的中、低频区域进行 DHT 变换, 仍然具有类似性质, 变换后的区域含有图像的细节特征, 将水印嵌入在其中一个近似原图的图形中可以减少对原图像改动所引起的失真.



a Lena原图



b 整体DCT域DHT变化后的图



c 局部DCT域DHT变化后的图

图 2 DCT 和 DHT 变换前后比较

3 水印嵌入

设原始图像为 F , 由二值图像生成水印信息 $w(i, j) (i = 1, 2, \dots, I; j = 1, 2, \dots, J)$, I, J 大小与水印图像大小对应.

嵌入步骤如下:

(i) 先对原始图像 F 做整体 DCT 变换 $F' = \text{dct}(F)$.

(ii) 选取适当的中低频段 DCT 系数矩阵 $LF_{2l \times 2j}' = F'(m:m+2l, n:n+2j)$, 进行 DHT 变换 $LF_{2l \times 2j}'' = \text{dht}(LF_{2l \times 2j}')$.

(iii) 水印信号嵌入 $LF_{2l \times 2j}''(1:I, 1:J)$ 的系数中, $q = \text{fix}(LF_{2l \times 2j}''(i, j) / \Delta)$, Δ 为量化步长, 量化步长定义为 $\Delta = \text{int}[\lambda \sum_{i=1, j=1}^{I, J} \text{abs}(LF_{2l \times 2j}''(i, j)) / (I \times J)] (0 < \lambda < 1)$. 若 q 的奇偶性与水印的正负关系匹配, 则 $LF_w''(i, j) = LF_{2l \times 2j}''(i, j) - \text{rem}(LF_{2l \times 2j}''(i, j), \Delta)$; 若不匹配, 则 $LF_w''(i, j) = LF_{2l \times 2j}''(i, j) + \Delta * \text{sign}(LF_{2l \times 2j}''(i, j)) - \text{rem}(LF_{2l \times 2j}''(i, j), \Delta)$.

(iv) 对 LF_w'' 进行 DHT 变换 $LF_w' = \text{dht}(LF_w'')$. DHT 变换矩阵等于其逆矩阵, 所以 DHT 变换等于 DHT 逆变换. $F_w'(m:m+2l, n:n+2j) = LF_w'$.

(v) 对 F_w' 进行 $IDCT$ 变换得到含有水印的图像 $F_w = \text{idct}(F_w')$.

水印嵌入算法框架如图 3 所示.

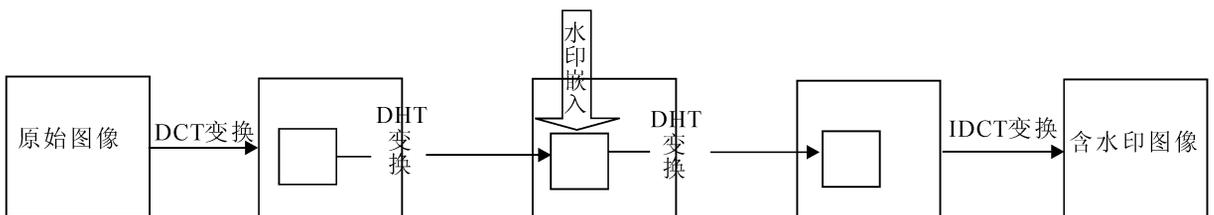


图 3 水印算法框架

4 水印提取和检测

水印提取步骤如下:

- (i) 对嵌入水印的图像 F_w 做整体 DCT 变换 $F'_w = \text{det}(F_w)$.
- (ii) $LF'_w = F'_w(i:i+2I, j:j+2J)$, 进行 DHT 变换 $LF''_w = \text{dht}(LF'_w)$.
- (iii) 生成二值图像序列为

$$\begin{cases} w(i, j) = 1 & \text{round}(LF''_w(i, j) / \Delta) \text{ 奇数,} \\ w(i, j) = 0 & \text{round}(LF''_w(i, j) / \Delta) \text{ 偶数.} \end{cases}$$

图像篡改检测为

$$cw(i, j) = \overline{w(i, j) \dot{\vee} w'(i, j)}$$

其中: cw 为检测矩阵; $w(i, j)$ 是原水印; $w'(i, j)$ 是提取出的水印; $\dot{\vee}$ 是异或运算; $\overline{\quad}$ 是逻辑非运算.

5 仿真实验

实验中采用峰值信噪比(PSNR)和主观视觉结合来评估水印质量,根据归一化互相关系数(NC)来判定原水印和提取水印的相似性.

PSNR 定义为 $PSNR = 10\lg(XY \max_{x,y} p^2_{x,y}) / \sum_{x,y} (p_{x,y} - p'_{x,y})^2$, 其中 $p_{x,y}$ 是原图像素, $p'_{x,y}$ 是嵌入水印后的像素.

NC 定义为 $NC = \sum_{i,j} (w(i, j) \dot{\vee} w'(i, j)) / (I \times J)$. 其中: $w(i, j)$ 是原水印; $w'(i, j)$ 是提取出的水印; $\dot{\vee}$ 是异或运算; \sim 是逻辑非运算.

图 4 是 48×48 的水印图像. 测试图像是 256×256 的 *Lena* 图像, 如图 5- a 所示. *DHT* 变换区域 F' ($25: 121, 25: 121$), $\lambda = 0.85$. 图 5- b 是嵌入水印后的图像, *PSNR* 为 45.062 6 db, *PSNR* 值和主观视觉都证实了嵌入的水印具有不可感知性. 图 6 是水印算法对一般图像处理 and 攻击的稳健性情况. 图 7 是篡改检测的情况.

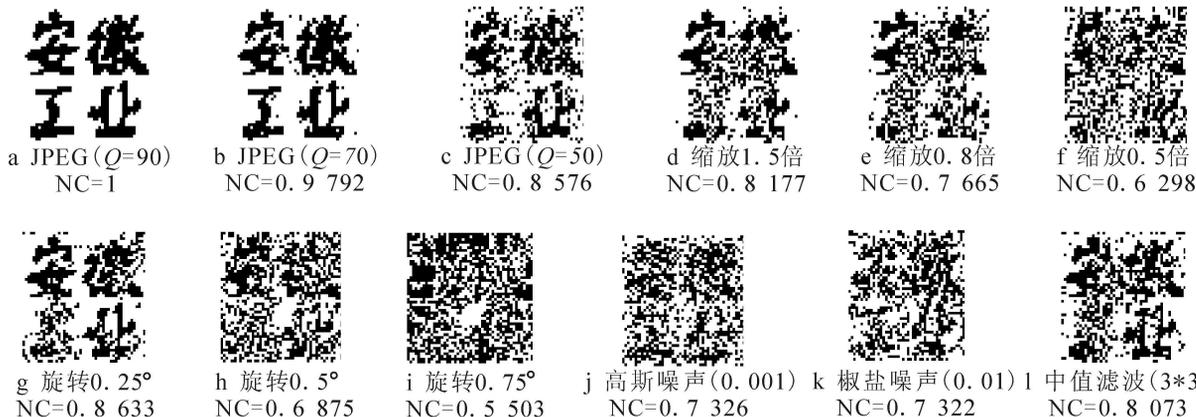


图 4 水印图像



a *Lena*原图 b 嵌入水印后的图

图 5 水印嵌入前后的比较





m 剪切后的Lena图像

n 剪切后提取的水印
NC=0.8915, 0.9774

图 6 稳健性测试



a 对图5剪切的篡改检测



b 对缩放(1.5, 0.8, 0.5倍)的篡改检测

图 7 篡改检测

6 结语

提出了一种基于 DCT 和 DHT 变换的半脆弱性水印方案, 具有以下特点:

- (1) 选择图像整体 DCT 变换后的中、低频域嵌入水印, 从而保证水印具有一定的稳健性和不可见性.
- (2) 对局部 DCT 中、低频域 DHT 变换后分成 4 个近似原图的图形, 将水印嵌入其中 $1/4$ 区域引起的图像失真较小, 同时该变换域具有原图的特征, 可以用来做篡改检测.
- (3) 水印的提取和检测不需要原始图像, 是盲水印算法.
- (4) 算法实现简单, 计算量小.

但是该方法对篡改定位还不够精确, 对旋转攻击抵抗性较差.

参考文献:

- [1] KUNDUR D, HATZINAKOS D. Digital Watermarking for Telltale Tamper-Proofing and Authentication [J]. Proc. IEEE, 1999, 87(7): 1167-1180.
- [2] 张静, 张春田. 用于 JPEG2000 图像认证的半脆弱性数字水印算法 [J]. 电子学报, 2004, 32(1): 157-160.
- [3] 李春, 黄继武. 一种抗 JPEG 压缩的半脆弱图像水印算法 [J]. 软件学报, 2006, 17(2): 315-323.
- [4] 陈生潭, 侯振华, 王虹现. 双重认证的变换域图像半脆弱数字水印算法 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2005, 17(5): 1114-1119.
- [5] 高铁杠, 顾巧论, 陈增强. 一种基于图像内容的半脆弱数字水印算法 [J]. 计算机科学, 2007, 34(12): 252-256.
- [6] COX I J, KILIAN J, LEIGHTON T, et al. Secure Spread Spectrum Watermarking for Multimedia [J]. IEEE Trans. on Image Processing, 1997, 6(12): 1673-1687.
- [7] HSUCHIOW-TING, WUJA-LING. Hidden Digital Watermarks in Images [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1999, 8(1): 58-68.

Semi-Fragile Watermarking Scheme Based on DCT and DHT

ZHOU Jia-qin^{1,2}, SHANGGUAN Cheng²

(1. College of Telecommunication, Hangzhou Electronics University, Hangzhou, 310018, China; 2. College of Computer Science and Technology, Anhui University of Technology, Maanshan 243002, Anhui China)

Abstract: A semi-fragile watermarking scheme needs robustness to some common attacks and capability of checking tamper. The combination of DCT and DHT is analyzed. From the analysis, a novel semi-fragile watermarking scheme is presented. In this scheme, the host image is first transformed by DCT, then some region of low or middle frequency coefficients is chosen to be transformed by DHT. Last, the watermark is embedded into the region. The watermark embedded into the low or middle frequency coefficients is robust. After the two transforms, there are some host image features in the transformed region so that the tampered region and sort of watermarked image can be reflected. Simulation results show that it is effective.

Key words: digital watermark; robust; semi-fragile; DCT; DHT

(责任编辑 向阳洁)