

基于 LDPC 码的数字图像水印技术研究

霍智勇¹⁾ 朱秀昌²⁾

¹⁾(南京邮电大学传媒技术学院, 南京 210003) ²⁾(南京邮电大学通信与信息工程学院, 南京 210003)

摘 要 图像水印系统和通信系统的模式具有相似性。为了提高数字水印的鲁棒性和降低传输过程的差错, 在研究低密度奇偶校验码(low density parity check, LDPC)在数字水印中的应用的基础上, 提出了一种基于 LDPC 码的图像数字水印技术。该技术利用了 LDPC 码的纠错性能和图像的人眼视觉特性, 实现了静止图像中数字水印的嵌入和提取; 实验结果表明, 该技术不仅降低了水印在传输过程中的差错率, 而且可以达到提高埋藏水印的鲁棒性和隐匿性的目的。

关键词 数字水印 低密度奇偶校验码 离散余弦变换

中图分类号: TP309 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2007)11-2018-08

A Study of Digital-image Watermarking Technique Based on LDPC

HUO Zhi-yong¹⁾, ZHU Xiu-chang²⁾

¹⁾(College of Communication Technology Nanjing University of posts and Telecommunication, Nanjing 210003)

²⁾(College of Telecommunication & Information Engineering Nanjing University of posts and Telecommunication, Nanjing 210003)

Abstract The goal of this paper was to investigate the application of the LDPC codes in Digital image watermarking. Based on the analysis of the equivalent channel in the digital watermarking system, a watermarking technique for digital image on the basis of LDPC code is proposed. The algorithm embeds and retrieves the watermark signature into and out of the static image by employing the LDPC code technology and the human visual characteristics. The results demonstrate that the proposed technique has greatly decreased the error code rate of the retrieved watermark and improved the robustness and invisibility.

Keywords digital watermark, low density parity check code, DCT

1 引 言

数字图像水印系统非常接近一个完整的保密通信系统。由于水印可以被看作是发送的信息, 图像是水印的信道和携带者, 图像的像素和可能受到的攻击可以看作是信道噪声, 因此给图像添加水印可以看成是一个数据通信问题。信息编码和水印生成器可以看成是信源处理, 水印嵌入可以看成是调制, 水印提取可以看成是解调制, 水印的检测和信息译码可以看成是信号接收后的处理操作。然后只有具有授权的人或设备才可以使用检测器从加过水印的图像中提取水印信息。

完善的数字图像水印应满足以下 3 个主要的条件: 具有较强的抗噪性、抗攻击性和能携带必要数量的比特信息^[1]。但这 3 个条件是相互矛盾和冲突的, 如果增大水印嵌入强度, 固然会提高水印的抗噪性能和抗攻击性能, 但是却会降低水印隐匿性和宿主图像的质量; 如果增加水印信道容量, 埋藏过多比特的水印信息, 则会使水印更容易受到退化或攻击的影响, 而降低水印的鲁棒性。

由于添加水印的过程可等效于一个数字通信系统, 因此可考虑使用某种纠错编码来提高图像携带水印信息的能力。本文正是基于此思想, 从信息编码的角度提出了一种基于纠错编码技术的数字水印算法。该算法以符合人眼视觉特性(human visual

收稿日期: 2005-11-21; 改回日期: 2006-09-14

第一作者简介: 霍智勇(1973 ~), 男, 副教授, 在职博士研究生。主要研究方向为图像处理和多媒体通信、数字视频特效与设计以及网络远程教育。E-mail: tom_huo@tom.com

system, HVS) 的离散余弦变换 (discrete cosine transform, DCT) 为基础, 利用低密度奇偶校验 (low density parity check, LDPC) 码的纠错性能, 通过进一步降低水印在传输过程中的差错率提高了水印的鲁棒性。使用 DCT 变换的原因是从实用的角度考虑的, 因 DCT 方式的水印运算量小于小波方式, 并可以在 JPEG、MPEG 这样的压缩方案中同步完成水印添加。

LDPC 码是目前第 3 代移动通信领域的研究热点, 也是 3G 方案的重要组成部分。该码具有很强的抗干扰能力, 且随着码长和码率的增大, 其性能还有较大的提高, 理论上其性能可以非常接近香农限。

在水印恢复时, 不需要原始水印图像对比, 直接利用专用密钥就可以进行盲检测。这样的做法更可靠方便, 也更接近实际。

2 非正则 LDPC 码的编译码实现

LDPC(n, p, k) 码^[2]属于线性分组纠错码, 可采用一个生成矩阵 G 将要发送的信息序列 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_k\}$ 转换成要传输的码字序列 $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ ($n > k$)。与生成矩阵 G 相对应的校验矩阵 $H_{(n-k) \times n}$ ($m = n - k$) 是一个稀疏校验阵, 即 H 中的“1”的个数很少, 几乎为一个全零矩阵。图 1 为 LDPC 的编译码框图。

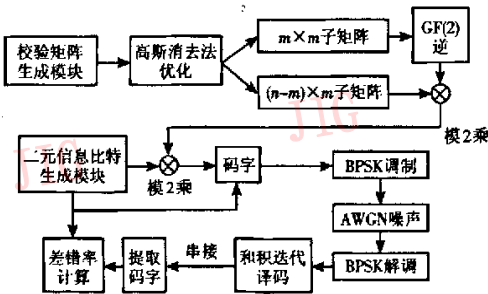


图 1 LDPC 码的编译码框图

Fig. 1 The encoding and decoding flow diagram of LDPC codes

编码是从生成非正则 LDPC 码的 $m \times n$ 大小的低密度奇偶校验矩阵开始, 在完成最初的矩阵生成之后, 就要消除矩阵中存在的短环, 然后对生成矩阵进行高斯消去法的优化, 优化后的奇偶校验矩阵在以后的译码中会提高译码效率。

接着进行二元信息编码, 若给定码字 u 和 $m \times n$

大小的奇偶校验矩阵, 则它们有如下关系: $u \cdot H^T = 0$, 假设信息比特 s 位于码字的后部, 校验比特 c 位于码字的前部, 即 $u = [c|s]$, 若将校验矩阵分为 $m \times m$ 大小的方阵 A 和一个 $(n - m) \times n$ 的子矩阵 B , 即 $H = [A|B]$, 矩阵 A 为单位阵, 且存在 $Ac + Bs = 0$ 这样的关系, 则 $c = A^{-1}Bs$ 。这时就可得到校验比特 c 。一旦校验比特 c 获得, 则最初的码字就可以通过 $u = [c|s]$ 获得^[3]。

这种生成的 LDPC 码字, 在进行 BPSK (bi-phase shift keying) 调制后, 即由单极性转变为双极性, 送入高斯信道。

当用户接收到码字之后, 首先进行 BPSK 解调制, 这时得到的码字为待译码字。

LDPC 码采用迭代译码算法, 由于算法是并行的, 因此译码速度快, 而且译码算法的复杂性远低于编码, 其运算量不会因为码长增加而急剧增加, 这是卷积码及其他分组码所不可比拟的。迭代译码可使用和积译码器完成。关于完整的译码算法可参考文献[4]。

3 图像水印的产生

对图像进行保护时, 可选取二值图像作为水印, 嵌入到 256 级灰度宿主图像之中。由于二值图像水印数据量小, 且具有明确视觉表达, 嵌入后即使受到强烈的干扰或攻击, 一旦得到恢复, 仍然能够为视觉辨识, 因此比传统的字符串水印具有更好的鲁棒性。假设宿主图像和水印图像分别为 $I(i, j)$, ($0 \leq i \leq M_1, 0 \leq j \leq N_1$), $W(i, j)$ ($0 \leq i \leq M_2, 0 \leq j \leq N_2$), 设定 DCT 的块尺寸 K 为 8×8 , 则要求嵌入的二值图像水印的大小 $M_2 \times N_2 \leq T$, 其中 $T = M_1 \times N_1 / K$ 为最大嵌入比特数。

图像水印嵌入前, 先进行 LDPC 编码, 同时将生成的码字进行扩频调制。扩频调制中生成伪随机序列所使用的密钥, 若采用图像密钥, 则具有更强的保密性。对于水印嵌入过程, 就是首先利用图像密钥 k 生成两组服从标准正态分布 $N(0, 1)$ 的大小为 $(1, M)$ 的伪随机序列 S_1, S_0 ; 接着通过循环查找确认出两个伪随机序列 S_1, S_0 高度不相关, M 为中频系数的个数。经 LDPC 编码后生成的码字为 1 维序列 $(1, n)$, 记为 W 。当 W 中的元素值为 1 时, 则取随机序列 S_1 进行调制; 当 W 中的元素值为 0 时, 则取随机序列 S_0 进行调制。

实验证明,这种方法不但增强了水印的鲁棒性和检测算法的可靠性,同时,密钥的使用还加强了安全性,并可以实现盲检测。

4 基于 HVS 和 DCT 的水印嵌入算法

如今 HVS 模型^[5] 不仅被多媒体数据压缩系统所利用,同样可以供数字水印系统所利用。虽然变换域图像的大部分能量集中在低频部分,但由于人眼对低频分量最为敏感,修改这部分频谱分量引起的失真容易被察觉,因此不满足“不可感知性”的要求;人眼虽对高频区域不敏感,但各种图像处理操作对图像的高频分量破坏很大,又不满足“鲁棒性”的要求。本文的做法是在一个选定的 8 × 8 块 DCT 域的“中频”区域进行水印嵌入。

DCT 块添加水印通常的方法是在 Z 字扫描图案中忽略少量的系数(如 6 个),然后添加在紧跟的每个 8 × 8 DCT 块的中频系数上。之所以选择这些系数的原因,是感知透明度和可靠性之间平衡的结果。图 2 标识出了每个块中选择嵌入水印的 16 个中频系数。图中左上系数对应于低频分量。

| | | | | | | | |
|----|----|----|----|----|----|----|--|
| 1 | 3 | 4 | 10 | 11 | 21 | 22 | |
| 2 | 5 | 9 | 12 | 20 | | | |
| 6 | 8 | 13 | 19 | | | | |
| 7 | 14 | 18 | | | | | |
| 15 | 17 | | | | | | |
| 16 | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |

图 2 8 × 8 DCT 块中添加水印的区域
Fig. 2 Marked region in 8 × 8 DCT block

修改后的 DCT 系数散布于整个图像(如图 3 所示)。图中黑色区域是标注的将要添加 DCT 系数的区域。在每个块中有 16 个系数被添加水印,用黑色图案显示。



图 3 块尺寸为 8 × 8 DCT 域(6 × 5 = 30 块)
Fig. 3 6 × 5 = 30 blocks of size 8 × 8 in the DCT domain

水印嵌入算法为加法规则,即在每个块的 DCT 中频系数上嵌入水印比特。

$$I_w(x,y) = I(x,y) + k \times W(x,y) \quad (1)$$

k 为嵌入强度因子,用于控制水印的嵌入强度。 $I(x,y)$ 为 DCT 后的中频系数, $|W(x,y)|$ 为由图像密钥 k 生成的伪随机序列。

5 水印的检测与提取

水印的译码首先要分别对已经加了水印的图像进行分块 DCT 变换,提取出每个 8 × 8 子块的中频系数;接着利用图像密钥 k 被用来再次生成相同的用于谱扩展的伪随机序列 m , m 的长度为 16, 与中频系数的数量相同;然后生成两组伪随机序列 \hat{S}_1, \hat{S}_0 ;接着通过循环查找确认出两个伪随机序列 \hat{S}_1, \hat{S}_0 高度不相关;最后将查找出的两组伪随机序列 \hat{S}_1, \hat{S}_0 分别通过和提取出的子块中频系数 \hat{I}_w 进行相关性计算来得到两组相关系数检测似然率 z_1 和 z_0 。另外,本文定义提取出的水印 1 维序列为 $(1, n)$, 记为 \hat{W} 。相关系数检测似然率定义为

$$\begin{cases} z_1 = \frac{\langle (|\hat{I}_w(i)| - \mu_{|I_w|}) \cdot (S_1(i) - \mu_{S_1}) \rangle}{\sqrt{\langle (|\hat{I}_w(i)| - \mu_{|I_w|}) \cdot (|\hat{I}_w(i)| - \mu_{|I_w|}) \rangle \cdot \langle (S_1(i) - \mu_{S_1}) \cdot (S_1(i) - \mu_{S_1}) \rangle}} \\ z_0 = \frac{\langle (|\hat{I}_w(i)| - \mu_{|I_w|}) \cdot (S_0(i) - \mu_{S_0}) \rangle}{\sqrt{\langle (|\hat{I}_w(i)| - \mu_{|I_w|}) \cdot (|\hat{I}_w(i)| - \mu_{|I_w|}) \rangle \cdot \langle (S_0(i) - \mu_{S_0}) \cdot (S_0(i) - \mu_{S_0}) \rangle}} \end{cases} \quad (2)$$

$\mu_{|I_w|}, \mu_{S_1}, \mu_{S_0}$ 为 $\hat{I}_w, \hat{S}_1, \hat{S}_0$ 的均值。

提取出的水印 \hat{W} 中第 i 个元素为 $\hat{W}(i)$, 其中 $1 < i < n$ 。如果 $z_1 > z_0$, 则 $\hat{W}(i)$ 置为“1”, 否则 $\hat{W}(i)$

置为“0”。

对提取出来的 \hat{W} 进行 LDPC 译码时, 水印信息比特是从经过检测的编码比特中通过译码产生的。

图 4 为基于 LDPC 码的数字图像水印系统的完整框图。

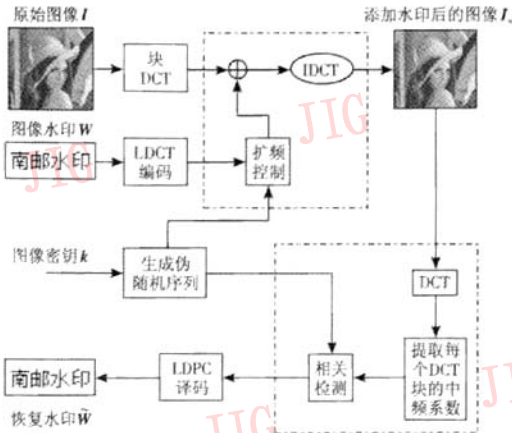


图 4 基于 LDPC 码的数字图像水印系统框图

Fig. 4 Flow diagram of digital-image watermarking system based on LDPC

6 实验仿真结果

本文使用 512 × 512pixels 的 Lena 图像为宿主图像(如图 5(a)所示)。图像密钥为 1 × 35pixels 的



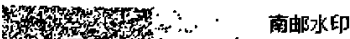
(a) 原始图像 I (512 × 512)



(b) 图像密钥 k (1 × 35, 放大 50 倍显示)

南邮水印

(c) 原始图像水印 W (50 × 20)



(d) LDPC 编码后的水印图像

图 5 实验结果

Fig. 5 Experiment results

灰度图像(如图 5(b)所示)。图像水印为 20 × 50pixels 的二值图像(如图 5(c)所示)。

实验主要使用 1 792 × 4 096bits 规模的低密度奇偶校验矩阵,列重为 4,行重不要求固定,但要求尽可能的小,以保证矩阵的稀疏性。由于该矩阵生成的 LDPC 码为非正则的,且比特节点的次数不固定,校验节点次数为 4,理论上说,非正则码的性能优于正则码,因此具有更好的纠错性能。

水印信息经过编码之后的码长为 4 096bits,编码效率(码率)为 0.437 5,译码采用迭代和积译码,最大迭代次数不超过 1 000 次。LDPC 编码后的信息序列经重排后转换为图像显示(如图 5(d)所示),左边的噪点部分为编码后添加的校验比特,右侧为紧跟的水印图像信息比特。

6.1 嵌入强度因子的影响

不同嵌入强度因子下的水印嵌入效果对比实验结果(如图 6 所示),当嵌入强度因子逐渐增大直至超过 8 时,主观评判可以明显察觉到噪纹的存在,且强度越大,噪纹越明显。而当嵌入强度因子小于 8 时,这时人眼已经感觉不到噪纹的存在,已达到隐匿的目的,此时嵌入水印的宿主图像与原始图像已没有能够察觉到的差别。

本文使用峰值信噪比(peak signal noise ratio, PSNR)衡量噪声大小,它是信号能量和噪声能量的比值,可用于对图像质量进行粗略分析。PSNR 计算式为

$$PSNR = 10 \lg \frac{X_{max}^2}{\frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N [X(i, j) - X_w(i, j)]^2} \quad (3)$$

这里的 X_{max} 是图像中最强的像素亮度值, $X_w(i, j)$ 是嵌入水印后像素点 (i, j) 的亮度值, $X(i, j)$ 是原图像像素点 (i, j) 的亮度值。PSNR 值至少要高于 38dB 才是可以接受的,这时的嵌入强度因子 k 在 8 附近。

如图 7 所示,下部虚线为 38dB 界线。由图中可以看出,当嵌入强度因子小于 1 时,曲线变化较为明显,这种变化仅限于数值上,视觉感官上难以察觉;而当嵌入强度因子大于 1 时,曲线变化较为平缓,图像质量表现为逐渐劣化。

另外,还分析了不同嵌入强度因子下提取出的水印差错率,比较结果如表 1 所示。随着嵌入强度因子 k 的降低,提取出的水印差错率也越来越大。实验结果表明,当嵌入强度因子 k 在 6 到 8 之间时,



图 6 不同嵌入强度因子下的水印嵌入效果

Fig. 6 Results of difference embedded strength factors

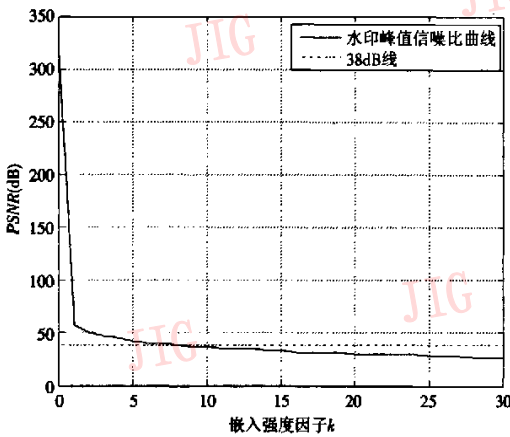


图 7 嵌入强度因子与 PSNR 关系曲线

Fig. 7 PSNR curve of difference embedded strength factors

表 1 $k \leq 10$ 时,不同嵌入强度因子下的水印提取效果对比

Tab. 1 PSNR Results of difference embedded strength factors when $k \leq 10$

| 嵌入强度因子 k | 未使用 LDPC 提取的水印 | 未使用 LDPC 的 误码率 (%) | 使用 LDPC 提取的水印 | 使用 LDPC 的 误码率 (%) | PSNR (dB) |
|------------|----------------|--------------------|---------------|-------------------|-----------|
| 10 | 南邮水印 | 0.4 | 南邮水印 | 0 | 35.8963 |
| 9 | 南邮水印 | 0.5 | 南邮水印 | 0 | 36.8114 |
| 8 | 南邮水印 | 0.9 | 南邮水印 | 0 | 37.8345 |
| 7 | 南邮水印 | 1.1 | 南邮水印 | 0 | 38.9943 |
| 6 | 南邮水印 | 1.6 | 南邮水印 | 0 | 40.3332 |
| 5 | 南邮水印 | 2.4 | 南邮水印 | 0.1 | 41.9169 |
| 4 | 南邮水印 | 3.4 | 南邮水印 | 6.8 | 43.8551 |
| 3 | 南邮水印 | 5.1 | 南邮水印 | 9.0 | 46.3538 |
| 2 | 南邮水印 | 8.1 | 南邮水印 | 14.9 | 49.8757 |
| 1 | 南邮水印 | 20.0 | 南邮水印 | 26.1 | 55.8963 |

水印的差错率为 0,而这时的 PSNR 值均大于 38dB,且视觉上难以察觉水印的存在,符合隐蔽性要求;另一方面,随着嵌入强度因子的减小,水印对抗攻击的能力也会下降,因此可选定 $k=8$ 为最佳嵌入强度因子,以平衡隐蔽性与鲁棒性之间的关系。

通过对比不同嵌入强度因子情况下的水印嵌入和提取情况,对在 LDPC 参与下的数字水印的嵌入和恢复过程进行了实验,并将数字水印信息加以 LDPC 编码和译码。该实验表明,和不加 LDPC 编码相比较,虽然水印的嵌入和提取时间增加了,但是其优越的性能还是令人满意的。

当使用 LDPC 编码后,就可以让水印嵌入强度因子大幅下降。在不使用 LDPC 纠错之前,水印无差错提取的嵌入强度因子至少要大于 21 时才能够实现,而在使用 LDPC 纠错之后,当嵌入强度因子大于 6 就可以实现,两者的 PSNR 值相差 10dB 以上 ($k=5$, $PSNR = 40.3333\text{dB}$; $k = 21$, $PSNR = 29.8757\text{dB}$)。由此可以看到 LDPC 数字图像水印优良的性能。

其次,由于降低了误码率,且实现了有效降低嵌入强度因子的目标,从而提高了水印嵌入的隐蔽性。

值得注意的是,LDPC 纠错码的纠错性能是有边界的。当差错量超出其纠错能力时,如嵌入强度因子降为 4 以下时,提取的水印差错率大幅增加,甚至超过没有编码的情况。而这种差错的校正边界的底线是和 LDPC 码的码率和码长有直接的关系。

6.2 LDPC 码率对水印提取的影响

码率是编码比特与编码后码长之比。码率的大小和埋藏的水印信息数量(水印容量)有一定的关系。当码率越小时,则意味着埋藏的水印信息可以越

多,而添加的信息冗余越少;当码率越大时,则意味着埋藏的水印信息可以越少,而添加的信息冗余越多。

为了保证信道信噪比不变,可固定嵌入强度因子 $k=5$,并且编码后的码长同为 $4\ 096\text{bits}$;宿主图像分辨率为 $512 \times 512\text{pixels}$,嵌入的图像水印分辨率为 $20 \times 50\text{pixels}$,在不同码率情况下进行 LDPC 编译码的性能对比观察如表 2 所示。由表 2 可以看出,码率 R 越大,其纠错性能越好,误码率越低,同时其信道容量也越小。因此在实际应用中,需要在码率与误码率之间寻找平衡点。

表 2 不同码率情况下的性能(误码率)和提取效果对比(相同码长 $4\ 096\text{bits}$,嵌入强度因子 $k=5$)

Tab.2 Results of difference code-rates, code length $4\ 096$, embedded strength factors $k=5$

| LDPC 编码矩阵规模(bits) | 码率 R | 误码率 (%) | 提取出的水印 |
|------------------------|--------|---------|--------|
| $1\ 792 \times 4\ 096$ | 0.44 | 0.1 | 清晰水印 |
| $1\ 536 \times 4\ 096$ | 0.38 ↓ | 4.8 ↑ | 清晰水印 |
| $1\ 280 \times 4\ 096$ | 0.31 ↓ | 5.4 ↑ | 清晰水印 |
| $1\ 048 \times 4\ 096$ | 0.26 ↓ | 5.9 ↑ | 清晰水印 |

6.3 抗 JPEG 压缩攻击性能

实验中设定嵌入强度因子 k 均为 8,以保证水印嵌入后的隐匿性。不同压缩品质情况下的水印提取效果比较如表 3 所示。由表 3 可以看出,随着压缩率的增大,水印提取差错率(简称差错率)有所增加。

表 3 不同压缩攻击下提取出的图像水印对比($k=8$)

Tab.3 Results of difference compress quality, $k \leq 8$

| JPEG 压缩品质因子 Q | 未使用 LDPC 提取的水印 | | 使用 LDPC 提取的水印 | |
|-----------------|----------------|---------|---------------|---------|
| | 提取出的水印 | 差错率 (%) | 提取出的水印 | 差错率 (%) |
| 25 | | 24.5 | | 30 |
| 50 | | 3.2 | | 4.5 |
| 85 | | 1.1 | | 0 |
| 100 | | 1.3 | | 0 |

图 8 为水印提取比特差错率与压缩品质因子 Q 之间的关系曲线,图中曲线显示了压缩品质因子 Q 与误差率之间的关系。曲线显示当压缩品质因子 Q 大于 50 时,LDPC 数字水印可以实现无差错提取,即差错率为零,而没有使用 LDPC 的情况仍然存在误码差错。结论是 LDPC 具有抵抗 JPEG 水印压缩攻击的性能,能够提供比较明显的抗攻击效果,从而提高了水印的鲁棒性。

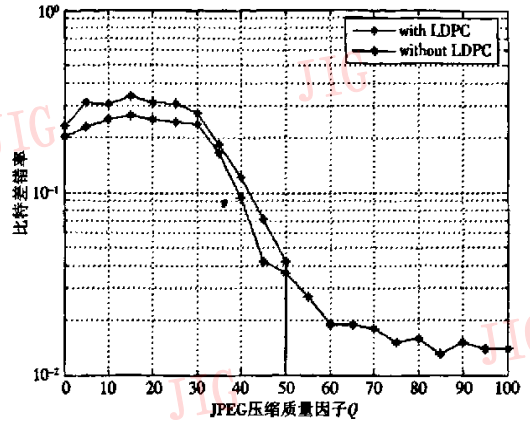


图 8 水印提取比特差错率与压缩品质因子的关系曲线($k=8$)

Fig.8 BER curves for JPEG compression

但是图 8 曲线也显示当压缩品质因子 $Q < 50$ 时,LDPC 提取数字水印的差错率和没使用 LDPC 时相当,在当前码长情况下,还略高一点,这是由于该 LDPC 码的纠错能力仅及于此所致,当噪声超出其纠错能力时,编码后的纠错优化性能就失去了。一旦压缩品质因子 $Q > 50$ 情况就变得完全不一样,这时的误码率为零,LDPC 数字水印优越的性能十分明显。

6.4 码长与抗噪性能的关系

由于 LDPC 编码后的码字长度越长,即编码矩阵的规模越大,其在相同信噪比下的误码率越小,因此当其码长达到一定时,其距离香农限越近。为了研究码长对水印的抗噪声影响,本文选择了 4 种不同规模的 LDPC 码: $4\ 096 \times 9\ 216\text{bits}$, $3\ 072 \times 6\ 400\text{bits}$, $2\ 048 \times 5\ 120\text{bits}$,以及前面使用的 $4\ 096 \times 1\ 792\text{bits}$ 。这些码的码率基本相同,均为 0.4 左右。由于最大的 LDPC 码编码后码长达到 $9\ 216\text{bits}$,因此实验中使用了高分辨率 (lena. bmp, $800 \times 800\text{pixels}$) 的 Lena 图像作为嵌入水印的载体。嵌入强度因子选为 $k=8$,这时可以保证嵌入水印后图像的 PSNR 值达到 38dB。

由表 4 可以观察到,在码率相同的情况下,随着码长的增加,其纠错能力逐渐提高,不仅误码性能下降,且系统的抗噪性得以提升。

因此可得到这样的结论,如果用较大规模的 LDPC 校验矩阵来进行水印编码,则不仅可以使得嵌入的水印图像更大,而且可以使其误码率下降到很低的水平,还可使得提取出的水印更为干净清晰。

表 4 不同码长情况下的水印提取效果对比(相似码率,嵌入强度因子 $k=8$)Tab.4 Results of difference code length, similar code rate, $k \leq 8$

| 叠加噪声百分比 (%) | 不同码长情况下提取出的水印及差错率 | | | | | | | |
|-------------|-------------------|---------|-------------|---------|-------------|---------|-------------|---------|
| | 4096 × 9216 | | 3072 × 6400 | | 2048 × 5120 | | 1792 × 4096 | |
| | 提取出的水印 | 差错率 (%) | 提取出的水印 | 差错率 (%) | 提取出的水印 | 差错率 (%) | 提取出的水印 | 差错率 (%) |
| 30 | 南邮水印 | 0 | 南邮水印 | 0 | 南邮水印 | 0 | 南邮水印 | 0 |
| 35 | 南邮水印 | 0 | 南邮水印 | 0 | 南邮水印 | 0 | 南邮水印 | 0 |
| 40 | 南邮水印 | 0 | 南邮水印 | 0 | 南邮水印 | 5.9 | 南邮水印 | 6.0 |
| 45 | 南邮水印 | 6.8 | 南邮水印 | 7.6 | 南邮水印 | 7.9 | 南邮水印 | 8.4 |
| 50 | 南邮水印 | 8.1 | 南邮水印 | 9.0 | 南邮水印 | 9.2 | 南邮水印 | 9.7 |

而使用较大规模的 LDPC 校验矩阵就需要图像能够嵌入足够多的信息比特。这种情况尤其适合于高分辨率、高清晰度图像保密的应用场合。

6.5 抗剪切攻击性能

LDPC 数字图像水印对抗剪切攻击具有一定的

优势,这来自于 LDPC 的纠错性能的贡献。当剪切比例达到 1/2 时,使用 LDPC 提取数字水印的差错率仅为 2.9%,而没使用 LDPC 之前为 13.9%,相差一个数量级,这体现了 LDPC 码的优良性能。实验结果如图 9 所示。


| 剪切比例 | 1/2 | 1/4 | 1/8 |
|---------|--|--|---|
| 宿主图像 |  |  |  |
| 恢复水印 | 南邮水印 | 南邮水印 | 南邮水印 |
| 差错率 (%) | 2.9 | 2.5 | 0 |

图 9 不同剪切比例下的水印提取

Fig.9 Results for different cropping scales

6.6 抗噪声攻击性能

LDPC 数字图像水印具有较强的抗噪声性能,当宿主图像被叠加高斯随机噪声比例达到 35% 以下时,系统可以无差错提取出水印,这表明 LDPC 码的运用起到了对抗噪声攻击的作用。同时 LDPC 码数字图像水印还能够对抗一定密度的椒盐噪声攻击。实验结果如图 10 所示。

7 结论

本文研究了一种基于 LDPC 码的数字水印技术,该技术充分利用了 LDPC 码的纠错性能,不仅

进一步降低了水印在传输过程中的差错率,而且提高了水印的抗攻击能力。通过研究和仿真结果得出了以下的结论:

(1) LDPC 数字图像水印既可以提高水印对抗多种攻击的鲁棒性,又可提高水印提取的质量。尽管由于增加了纠错编译码模块而增加了水印嵌入和提取的时间,但是所带来的性能的提升还是值得的。特别是可以降低嵌入强度,其在提高水印的隐匿性方面的能力还是十分突出的。

(2) 通过降低 LDPC 码率,可以在水印中嵌入更多的信息,以提高水印嵌入的容量,这也是 LDPC 数字水印所带来的另一方面的益处。尽管降低码率

| | | 噪声叠加比例(%) | | 椒盐噪声(噪声密度=0.01) |
|--------|---|---|---|-----------------|
| | | 45 | 100 | |
| 宿主图像 |  |  |  | |
| 恢复水印 |  |  |  | |
| 差错率(%) | 8 | 22.9 | 8 | |

图 10 不同噪声叠加比例下的水印提取和对抗椒盐噪声攻击的实验结果

Fig. 10 Experiment Results of watermark extracting in various noise attack

会带来差错率的上升,但是由于 LDPC 码具有较好的纠错能力,使得码率下降后的差错率仍然可以满足一些场合的应用。

(3) LDPC 编码的水印非常适合于高分辨率、高清晰度的嵌入应用场合,如卫星地图、电影图像、HDTV 等。被嵌入的对象可以是高分辨率的图像或语音、音乐,这样不仅可以嵌入具有海量信息的数字水印,而且可以得到很好的抗攻击性能和更低的嵌入强度,以便实现大信息量、高鲁棒性、强隐匿性的数字水印嵌入。因此 LDPC 数字图像水印是具有很好的应用前景的水印技术。

参考文献(References)

1 Cox J, Miller M L, Bloom J A. Digital Watermarking[M], San Francisco, San Diego, CA, USA: Morgan Kaufman Publishers,

2001.

2 Gallager R G. Low-density parity-check codes[J]. IRE Transactions on Information Theory, 1962, 8(1): 21~28.

3 Sun Shao-hui, Mu Jian-jun, Wang Xin-mei. Study and advances of low density parity check codes[J]. Journal of Xidian University, 2001, 28(3): 393~397. [孙韶辉, 慕建君, 王新梅. 低密度校验码研究及其新进展[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2001, 28(3): 393~397.]

4 Mackay D J C. Good error-correcting codes based on very sparse matrices[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1999, 45(2): 399~431.

5 Yi Kai-xiang. Study of Digital-image Encrypt and Digital-waterimage Technology[D]. Hangzhou: Zhejiang University National Laboratory of CAD & CG, Zhejiang University Doctor Master Dissertation, 2001.

7. [易开祥. 数字图像加密与数字水印技术研究[D]. 杭州: 浙江大学 CAD & CG 国家重点实验室,《浙江大学博士学位论文》, 2001. 7.]