

利用边信息嵌入的 CDMA 水印信道性能研究

方艳梅^{1,2}, 谷利民^{2,3}, 黄继武^{1,2}

(1. 中山大学信息科学与技术学院, 广东广州 510275 2. 广东省信息安全技术重点实验室, 广东广州 510275

3. 中国建设银行北京研发中心, 北京 100055)

摘 要: 稳健性是数字水印的重要指标之一. 为了改善水印稳健性, CDMA 技术已被引入到数字水印中. 但是, 目前基于 CDMA 扩频技术的水印算法基本都是通过实验方式来确定嵌入强度以及相关参数. 本文分析了把载体作为边信息情况下 CDMA 水印信道的性能. 研究了 PSNR 值, 嵌入强度参数 β , 正交码码长 N 以及用户数 K 之间的关系, 给出了 PSNR 关于这三者的显式表达式. 根据 PSNR 值, 给出了水印嵌入强度参数 β 的估计算法, 仿真实验结果表明估计的有效性. 并指出 CDMA 水印信道中, 用户数不影响 PSNR 值的大小, 实验结果有力地支持了这个结论. 通过分析 CDMA 水印信道的误码形成过程, 给出了信道误码率表达式, 并得出, 在给定 PSNR 值的情况下, CDMA 正交扩频码码长 N 的选择不影响信道误码率值.

关键词: 数字水印; CDMA; 水印信道; 边信息; 叠加嵌入

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2006) 01-0045-06

Performance Analysis of CDMA-Based Watermarking Channel with Side-Information Embedding

FANG Yanmei^{1,2}, GU Limin^{2,3}, HUANG Jiwu^{1,2}

(1. School of Information Science and Technology, Sun Yat-Sen University, Guangzhou, Guangdong 510275 China;

2. Guangdong Key Laboratory of Information Security Technology, Sun Yat-Sen University, Guangzhou, Guangdong 510275 China;

3. Beijing Research and Development Center, China Construction Bank, Beijing 100055 China)

Abstract Robustness is one of the important requirements of digital watermarking. To improve robustness, CDMA (Code Division Multiple Access) technologies have been introduced into digital watermarking. However, most existing CDMA-based watermarking parameters are usually determined via experience. With the side-information embedding scheme, we have analyzed the relationship between PSNR, embedding strength, orthogonal codes length and number of users in the case of CDMA additive embedding. The expression for estimating the embedding strength is derived in terms of PSNR. Experimental results show the estimating is effective. Furthermore, while keeping the PSNR constant, the relationship between spread code length and watermark bit error rate is analyzed. As a conclusion, when keeping the length of watermark bits and PSNR constant, the choice of orthogonal spreading code does not influence watermark bit error rate. The conclusion can be used to guide the actual watermarking system to choose the correct embedding parameters.

Key words digital watermarking; CDMA; watermark channel; side information; additive embedding

1 引言

稳健性是数字水印的重要性能指标. 误码率常被用来衡量水印稳健性. 由于水印信道与数字通信信道之间的相似性, 人们把水印信道看作通信信道^[1,2]. 这样, 就可以利用通信领域中成熟的理论和技术降低水印误码率以改善稳健性. 这方面的工作已经报道的有纠错码、交织码、TCM 码、扩频技术等数字水印中的应用. 在无线通信中, CDMA (Code Division Multiple Access) 系统得到了广泛的应用, 它具有可多址复用、容量大、保密性好、抗干扰能力强、

抗噪声等优点. CDMA 技术用给定的伪随机编码调制用户数据, 实现码分多址, 按编码分配用户. 于是, 人们把 CDMA 技术引入到数字水印中, 以提高水印系统的容量并改善水印稳健性.

然而, 水印信道与一般通信信道之间存在区别^[3], 对水印信道进行性能分析有利于找到水印信道的本质特征, 建立更准确的水印信道模型. 目前, 基于纠错码的水印信道性能分析已取得一些结果^[4,5], 而基于 CDMA 扩频叠加的水印嵌入算法基本都是通过实验的方式来确定嵌入强度以及相关参数^[6-8]. 由于水印信道中对不可觉察性的要

收稿日期: 2005-02-05 修回日期: 2005-04-20

基金项目: 国家杰出青年基金 (No. 60325208); 国家自然科学基金重点项目 (No. 60133020, 60403045); 广东省自然科学基金团队项目 (No. 04205407)

求(通过 PSNR 度量)使得水印容载和稳健性之间互相矛盾,在系统设计时需要考虑这种问题. 在我们前期的工作^[9]中,我们分析了基于简单叠加嵌入的 CDMA 水印信道性能.

在 Shannon^[10]提出的带边信息的通信理论基础上, Cα 等^[11]提出如果在水印嵌入或编码时利用载体的知识作为边信息,可以提高水印性能. 然而,在这种情况下下的水印信道误码率性能及有关参数估计方法尚需进一步研究.

本文分析了利用边信息嵌入情况下的 CDMA 水印系统性能,包括 PSNR 值的估计、嵌入强度参数 β 的估计、正交码长 N 以及用户数 K 之间的关系,并用仿真实验验证了分析的结果;对于给定的 PSNR 值,给出了嵌入强度的计算表达式,并用仿真实验验证了算法的精度;本文还给出了利用边信息嵌入情况下 CDMA 信息的信道误码率表达式. 虽然本文实验中使用的是 Walsh 码,然而,本文的结论是适合所有正交扩频码的. 本文的研究工作将有助于揭示 CDMA 通信技术在水印方面的作用,并引导在实际设计水印系统时正确选择有关参数.

本文结构如下. 在第 2 节中,介绍了 CDMA 水印系统模型,包括应用 CDMA 技术进行水印的嵌入和检测. 在第 3 节中,分析了 CDMA 水印信道误码率,给出了误码率的显式表达式. 在第 4 节中,给出了 CDMA 水印信道中 PSNR 值的计算表达式以及嵌入强度参数 β 的计算表达式,并且得出用户数不影响 PSNR 值的结论. 在第 5 节中,分析了在给定 PSNR 值情况下嵌入强度、扩频码码长与信道误码率之间的关系. 最后给出结论.

2 CDMA 水印模型及算法分析

从有 I 个元素的正交码集 $G' (G' = \{g_k(n)\}, n = 1, 2, \dots, N, k = 1, 2, \dots, I)$ 中选取 K 个正交码构成许用码组 $G (G = \{g_k(n)\}, n = 1, 2, \dots, N, k = 1, 2, \dots, K)$, 依据某种规则,在 CDMA 水印系统中我们为每个用户分配一个扩频码.

设水印比特序列 B 为双极性的,它有 R 个元素, $B = \{b_k(j)\}, k = 1, 2, \dots, K, j = 1, 2, \dots, R$. 其中 $b_k(j) \in \{-1, +1\}$, 表示用第 k 个用户所传输的第 i 个水印比特.

应用 CDMA 编码后,水印信号为 $C = \{c_i\}$, 且 c_i 满足如下关系:

$$c_i = \sum a_{k,i} \cdot b_{k,i} \cdot g_k, i = 1, 2, \dots, RN \quad (1)$$

其中, g_k 为集合 G 的第 k 个元素(即,第 k 个用户的扩频码), $a_{k,i}$ 为第 k 个用户的第 i 个水印比特的嵌入强度. 因此, c_i 是 N 维向量.

这里,我们要研究的不是恒定 α 水印系统(即, $a_{k,i} = \alpha$ 对所有的 k 都成立),而是可变 α 水印系统^[12]. 可变 α 水印系统可看作利用载体图像作为边信息的水印嵌入. 通过调节每个 $a_{k,i}$ 的大小,使得不同载体图像嵌入水印后与扩频码的线性相关值 $(1 + \beta)$ 保持不变,这在一定程度上减少了载体图像对水印稳健性的影响. 其中,为线性相关检

测判决门限, β 是一个与嵌入强度有关的参数.

水印系统的工作频段选择在载体变换域的中高频. CDMA 编码以如下方式修改载体变换域系数,从而实现水印嵌入:

$$c_i^{(w)} = c_i^{(0)} + c_p, i = 1, 2, \dots, RN \quad (2)$$

其中, $C_0 = \{c_i^{(0)}\}$ 载体变换域系数组成的向量, $C_w = \{c_i^{(w)}\}$ 则是对 C_0 修改的结果, $C = \{c_i\}$ 是 CDMA 编码后的水印信号.

若此时对 C_w 作线性相关检测,则有:

$$\begin{aligned} z_{k,i}(c_i^{(w)}, g_k) &= \frac{1}{N} (c_i^{(0)} \cdot g_k + c_i \cdot g_k) \\ &= \frac{1}{N} [c_i^{(0)} \cdot g_k + (\sum_{k=1}^K a_{k,i} \cdot b_{k,i} \cdot g_k) \cdot g_k] \end{aligned} \quad (3)$$

由于 $\{g_k\} (k = 1, 2, \dots, K)$ 是正交的,因此,上式可写为:

$$z_{k,i}(c_i^{(w)}, g_k) = \frac{1}{N} (c_i^{(0)} \cdot g_k) + a_{k,i} b_{k,i} \quad (4)$$

这里,我们令 $z_{k,i}(c_i^{(w)}, g_k) = (1 + \beta) b_{k,i}$, 这保证了相关检测值的正负与当前水印比特 $b_{k,i}$ 保持一致. 于是,上式可写为:

$$\begin{aligned} (1 + \beta) b_{k,i} &= \frac{1}{N} (c_i^{(0)} \cdot g_k) + a_{k,i} b_{k,i} \\ a_{k,i} &= (1 + \beta) - \frac{1}{b_{k,i} N} (c_i^{(0)} \cdot g_k) \end{aligned} \quad (5)$$

把上式代入式(1)得出:

$$c_i = (1 + \beta) \sum_{k=1}^K b_{k,i} g_k - \frac{1}{N} \sum_{k=1}^K (c_i^{(0)} \cdot g_k) g_k, i = 1, 2, \dots, RN \quad (6)$$

把上式代入式(2)就实现了水印的嵌入,得到嵌有水印的媒体 C_w .

检测端的输入为 $C_{wn} = C_w + n_0$, 它是嵌入端输出 C_w 叠加加性噪声 n_0 后产生的结果. $C_{wn} = \{c_i^{(wn)}\}$, 其中, $c_i^{(wn)} = c_i^{(w)} + n_0, n = 1, 2, \dots, RN$.

在水印检测时使用线性相关以盲检测的方式提取水印比特. 对 C_{wn} 与扩频码 $\{g_k\}$ 作线性相关,其结果为:

$$\begin{aligned} \eta_{k,i} &= \frac{1}{N} (c_i^{(wn)} \cdot g_k) = \frac{1}{N} (c_i^{(0)} + n_0 + c_i) \cdot g_k \\ &= \frac{1}{N} (c_i^{(0)} \cdot g_k) + \frac{1}{N} (n_0 \cdot g_k) + \frac{1}{N} (c_i \cdot g_k) \\ &= \frac{1}{N} (c_i^{(0)} \cdot g_k) + \frac{1}{N} (n_0 \cdot g_k) + \frac{1}{N} [(1 + \beta) (\sum_{k=1}^K b_{k,i} g_k) \cdot g_k - \frac{1}{N} (\sum_{k=1}^K (c_i^{(0)} \cdot g_k) g_k) \cdot g_k] \end{aligned} \quad (7)$$

同样,由于扩频码组 $\{g_k\}$ 是正交的,于是上式可简化为:

$$\begin{aligned} \eta_{k,i} &= \frac{1}{N} (c_i^{(0)} \cdot g_k) + \frac{1}{N} (n_0 \cdot g_k) + [(1 + \beta) b_{k,i} - \frac{1}{N} (c_i^{(0)} \cdot g_k)] \\ &= (1 + \beta) b_{k,i} + \frac{1}{N} (n_0 \cdot g_k), k = 1, 2, \dots, K, i = 1, 2, \dots, RN \end{aligned} \quad (8)$$

可以用如下判别公式来进行水印比特的检测.

$$b'_{k,i} = \begin{cases} +1 & \text{if } \eta_{k,i} > t \\ -1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

为判决门限. 通过比较 $b'_{k,i}$ 与 $b_{k,i}$ 的差别, 就可以得到检测误码率.

3 CDMA 扩频水印信道误码率分析

本节分析基于上述模型的 CDMA 扩频水印信道误码率特性, 以及影响水印信道误码率的决定性因素.

3.1 信道误码率框架

由于信道噪声的存在, 水印信息可能发生误码. 为简单起见, 我们假设信道噪声为高斯白噪声, 即, $n_0 \sim N(0, \sigma^2)$. 于是, 信道误码率为:

$$p_e = P\{\eta_{k,i} \leq t | b_{k,i} = +1\} P\{b_{k,i} = +1\} + P\{\eta_{k,i} > t | b_{k,i} = -1\} P\{b_{k,i} = -1\} \quad (10)$$

不失一般性, 可假设水印比特服从等概率贝努利分布, 即 $P\{b_{k,i} = +1\} = P\{b_{k,i} = -1\} = \frac{1}{2}$. 这可以通过随机交织来实现. 于是, 上式演变为:

$$p_e = \frac{1}{2} [P\{\eta_{k,i} \leq t | b_{k,i} = +1\} + P\{\eta_{k,i} > t | b_{k,i} = -1\}] \\ = \frac{1}{2} [P\{\eta_{k,i} - t \leq 0 | b_{k,i} = +1\} + P\{\eta_{k,i} - t > 0 | b_{k,i} = -1\}] \quad (11)$$

把式 (8) 代入上式, 得:

$$p_e = \frac{1}{2} P\{\beta + \frac{1}{N} (n_0 \cdot g_k) \leq 0 | b_{k,i} = +1\} \\ + \frac{1}{2} P\{-2t - \beta + \frac{1}{N} (n_0 \cdot g_k) > 0 | b_{k,i} = -1\} \quad (12)$$

令 $z_1 = \beta + \frac{1}{N} (n_0 \cdot g_k)$ 和 $z_2 = -2t - \beta + \frac{1}{N} (n_0 \cdot g_k)$, 由于 $n_0 \sim N(0, \sigma^2)$, 依据高斯分布的性质可知, 随机变量 z_1 和 z_2 仍然服从高斯分布, 即 $z_1 \sim N(\beta, \frac{\sigma^2}{N})$, $z_2 \sim N(-2t - \beta, \frac{\sigma^2}{N})$. 于是, 上式可写为:

$$p_e = \frac{\sqrt{N}}{2\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^0 \exp\left\{-\frac{N(x-\beta)^2}{2\sigma^2}\right\} dx \\ + \frac{\sqrt{N}}{2\sqrt{2\pi}\sigma} \int_0^{+\infty} \exp\left\{-\frac{N(x+2t+\beta)^2}{2\sigma^2}\right\} dx \quad (13)$$

简化上式得:

$$p_e = \frac{1}{2} Q\left[\frac{\sqrt{N}\beta}{\sigma}\right] + \frac{1}{2} Q\left[\frac{\sqrt{N}(2t+\beta)}{\sigma}\right] \quad (14)$$

由式 (9) 可以看出, 当 $t \neq 0$ 时, 这个水印信道是非对称的. 事实上, 它的作用在于降低水印检测的虚警概率 (false alarm probability). 在一般的水印系统中, 水印信息长度通常要求至少几十比特. 相应的水印检测虚警概率非常小, 可近似认为 $t=0$. 在这种情况下, 水印信道就可以模型化为二

元对称信道. 于是, 信道误码率为:

$$p_e = Q\left[\frac{\sqrt{N}\beta}{\sigma}\right] \quad (15)$$

可以看到, 信道误码率 p_e 和用户数 K 没有关系, 只是和 β 噪声功率 σ^2 、正交码码长 N 有关系. 上述结论是在线性相关检测情况下得到的, 但是, 可以容易的推广到归一化相关检测的情况.

3.2 PSNR 值估计

根据文献 [12] 中, 对于给定的 PSNR 值 T_{PSNR} 有如下关系成立:

$$T_{\text{PSNR}} \leq 20 \log_0 \frac{\sqrt{L_1 L_2} b_m}{\sqrt{\sum_i \|c_i^{(w)} - c_i^{(0)}\|^2}} \\ = 20 \log_0 \frac{\sqrt{L_1 L_2} b_m}{\sqrt{\sum_i \|c_i\|^2}} \\ = 20 \log_0 \frac{\sqrt{L_1 L_2} b_m}{\sqrt{\sum_i \sum_n c_i^2(n)}} \quad (16)$$

其中, $i = 1, 2, \dots, R, N$, $n = 1, 2, \dots, N$, 图像尺寸为 $L_1 \times L_2$, b_m 为图像中的最大灰度值, $c_i = \{c_i(n)\}$, $n = 1, 2, \dots, N$, $c_i(n)$ 为水印嵌入时对每个变换域系数作的改动.

由式 (6) 可知,

$$c_i(n) = (t + \beta) \sum_{k=1}^K b_{i,k} \cdot g_k(n) - \frac{1}{N} \sum_{k=1}^K (c^{(0)} \cdot g_k) g_k(n), \\ i = 1, 2, \dots, R, K, n = 1, 2, \dots, N \quad (17)$$

为了便于分析, 我们令

$$X_{i,n} = (t + \beta) \sum_{k=1}^K b_{i,k} g_k(n) \\ Y_{i,n} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^K (c^{(0)} \cdot g_k) g_k(n) \\ i = 1, 2, \dots, R, K, n = 1, 2, \dots, n \quad (18)$$

容易知道, 随机变量序列 $\{X_{i,n}\}$ 与 $\{Y_{i,n}\}$ 互相独立. 式 (18) 可写为:

$$c_i(n) = X_{i,n} - Y_{i,n} \quad (19)$$

对于第 k 个用户的数据来说, 扩频码 $g_k(n) \in \{+1, -1\}$ 是已知的, 只有 $b_{k,i}$ 是随机的. 不失一般性, 仍然把 $b_{k,i} \in \{+1, -1\}$ 看作服从等概率贝努利分布, 它的均值和方差分别为 $E\{b_{k,i}\} = 0$, $D\{b_{k,i}\} = 1$. 依据 Lindeberg-Levy 定理^[13], 多个独立同分布的随机变量之和可用高斯分布来近似. 于是, $X_{i,n}$ 可看作服从均值为 0, 方差为 $(t + \beta)^2 K$ 的高斯分布, 即 $X_{i,n} \sim N(0, (t + \beta)^2 K)$.

不失一般性, 可假设载体变换域系数 $c_i^{(0)}$ 服从某种概率分布 (比如, 高斯分布, Laplace 分布等)^[14-15], 它的均值为 0, 方差为 σ^2 . 于是, $Y_{i,n}$ 可看作随机变量 $c_i^{(0)}$ 的线性组合, 依据概率论的知识可知,

$$E(Y_{i,n}) = Q D(Y_{i,n}) = \frac{K \sigma_0^2}{N} \quad (20)$$

随机变量 $c_i^2(n)$ 的均值为:

$$\begin{aligned} E[c_i^2(n)] &= E[(X_{i,n} - Y_{i,n})^2] \\ &= E[X_{i,n}^2] + E[Y_{i,n}^2] - 2E[X_{i,n}]E[Y_{i,n}] \\ &= E[X_{i,n}^2] + E[Y_{i,n}^2] = (\beta + 1)^2 K + \frac{K \sigma_0^2}{N} \end{aligned} \quad (21)$$

于是, 可把 $\{c_i^2(n)\}$ 看作是互相独立的随机变量序列, 它们服从相同的分布, 且具有有限的数学期望. 依据辛钦大数定理^[16], 对于任意的 ε 有下式成立:

$$\lim_{N \rightarrow \infty} P\left\{\left|\frac{K}{RN} \sum_{i=1}^R \sum_{n=1}^N c_i^2(n) - E\{c_i^2(n)\}\right| < \varepsilon\right\} = 1 \quad (22)$$

从而, $\sum_{i=1}^R \sum_{n=1}^N c_i^2(n)$ 可以用下式来近似:

$$\sum_{i=1}^R \sum_{n=1}^N c_i^2(n) = \frac{RN}{K} \cdot E\{c_i^2(n)\} = RN(\beta + 1)^2 + R\sigma_0^2 \quad (23)$$

上式依概率 1 成立. 把它代入式 (16), 得:

$$T_{\text{PSNR}} \leq 20 \log_{10} \frac{\sqrt{L_1 L_2} b_m}{\sqrt{RN(\beta + 1)^2 + R\sigma_0^2}} \quad (24)$$

其中, 图像尺寸为 $L_1 \times L_2$, b_m 为图像中的最大灰度值, R 为水印信息比特数, N 为扩频正交码码长, σ_0^2 为载体噪声功率, 为水印比特检测判决门限, β 为嵌入强度的参数.

需要注意的是, 依据前面 3.1 节的讨论, 可令 $\beta = Q$ 从而有

$$T_{\text{PSNR}} \leq 20 \log_{10} \frac{\sqrt{L_1 L_2} b_m}{\sqrt{R(N\beta^2 + \sigma_0^2)}} \quad (25)$$

得出, PSNR 值将只与水印信息比特数 R 、CDMA 扩频码码长 N 、嵌入强度的参数 β 以及 σ_0^2 有关, 而与所使用的用户数 K 没有关系.

3.3 嵌入强度参数的估计

在给定水印信息比特数 R 、扩频码长 N 、载体变换域系数方差 σ_0^2 、 L_1 和 L_2 的情况下, 嵌入强度与 PSNR 值满足如下关系:

$$\beta \leq \sqrt{\frac{L_1 L_2 b_m^2 10^{(-T_{\text{PSNR}}/10)} - R\sigma_0^2}{RN}} \quad (26)$$

β 值越大, 水印稳健性越好. 于是在估计 β 时, 我们令上式取 “=”.

我们使用 $256 \times 256 \times 8$ bits 的 “Lena” 图像和 “Baboon” 图像作为测试图像, 水印比特数分别为 $R = 64$ 和 $R = 128$. 扩频码选择常见的 Walsh 码, 码长为 $N = 32$. Walsh 码是一种由哈达玛矩阵生成的正交码, 利用这样的矩阵, 可以生成任意 $2^n \times 2^n$ (n 为正整数) 的正交 Walsh 码. 用户数为 $K = 16$ 使用 “db1” 小波的 HL_2 子带作为工作频带. 事实上, HL_2 子带 (大小为 64×64) 的系数足以容纳这两个方案中的水印比特.

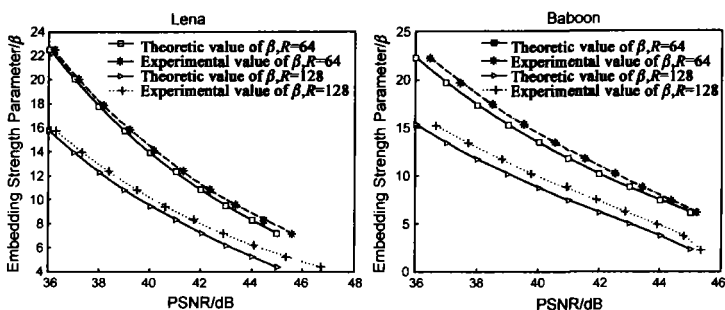


图 1 嵌入强度参数的理论值和实际值的关系 (测试图像分别为 “Lena” 和 “Baboon” 图像)

所以, 这里对每幅测试图像来说, 相应的 σ_0^2 就等于图像 HL_2 子带的方差 (大小分别为 448.61 和 882.10).

图 1 是实验值与理论值比较的结果. 可以看出, β 的理论值与实际值比较吻合. 值得注意的是, 在上式中根号下面的部分要大于零, 对于给定的载体图像和 T_{PSNR} 值, 需要选择载体变换域系数方差 σ_0^2 较小的频段作为水印工作域, 则可获得较大的 β 值, 有助于改善水印稳健性.

3.4 用户数 K 与 PSNR 的关系

CDMA 技术应用于数字水印时, 一个重要的问题就是用户数 K 的确定, 因为 K 的大小直接关系着图像的局部失真. 那么, 自然的就有一个问题: K 的大小与 PSNR 值有没有关系? 如果有的话, 那么, 如何确定最优的用户数 K ?

从式 (15) 可看出, PSNR 值与用户数 K 的大小没有关系. 这一点可以解释为: 图像的 PSNR 值衡量的是由嵌入水印而引起的图像失真, 它规定了水印信号的总能量的大小, 但是, PSNR 值与水印能量的分布方式没有关系. 也就是说, 只要水印能量保持不变, 那么, 不管水印嵌入会改变多少个变换域系数, 其 PSNR 值都不会改变. 这意味着, 用户数 K 的变化将不影响 PSNR 值的大小. 从图 2 可看出, 用户数与 PSNR 值之间没有直接联系.

这里我们的实验参数基本和图 1 中的类似: 用 $256 \times 256 \times 8$ 的 “Lena” 图像和 “Baboon” 图像作为测试图像, 水印比特数为 $R = 128$, Walsh 码长为 $N = 32$. 使用 “db1” 小波的 HL_2 子带作为工作频带. 为了实现的方便, 我们要求 RK 为整数, 因此, 选择用户数为 $K = 4, 8, 16$.

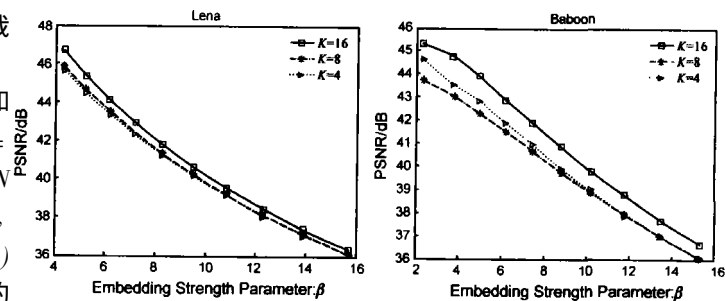


图 2 用户数 K 与 PSNR 值之间的关系 (水印比特数 $R = 128$, 码长为 $N = 32$)

4 影响水印信道误码率的因素

这里, 我们分析在给定 PSNR 值的情况下, 嵌入强度、扩频码长和信道误码率三者之间的关系。

依据式 (15), 信道误码率 p_e 是关于嵌入强度参数 β 和扩频码长 N 的函数。 β 的增大有助于降低信道误码率。 同样的, 正交码长 N 的增大也有助于降低信道误码率。 即, 这两个方法都可以改善水印的稳健性。 事实上, 在数字水印的研究中, 人们更关心在给定失真 (用 PSNR 度量) 范围内, 如何设计最佳水印方案? 这就涉及到水印嵌入强度 β 、扩频码类型及其码长 N 的选择策略。

当水印信息比特数 R 、PSNR 值、原始图像以及工作频段 (直接影响 σ_0^2 的取值) 都给定时, 依据式 (25), 对于不同 β 和 N 有如下关系成立:

$$\beta_1 \sqrt{N_1} = \beta_2 \sqrt{N_2} \quad (27)$$

其中, $\beta_1 N_1$ 和 $\beta_2 N_2$ 分别对应不同扩频编码方案的嵌入强度参数和扩频码码长。 再考虑到式 (15), 可知, 当水印信息比特数 R 、PSNR 值、原始图像以及工作频段都给定时, 对于高斯噪声来说, 不同码长的扩频编码方案有相同的信道误码率。 也就是说, 在这种情况下, 不同码长的扩频水印方案有同样的稳健性。

实验使用 $256 \times 256 \times 8$ bits 的“Lena”、“Baboon”、“Fishboat”和“Pepper”图像作为测试图像, 具有不同的纹理复杂性。 我们使用“db1”小波的 HL_2 子带作为工作频段, PSNR 值选择为 40.0 dB。 正交扩频码选择常见的 Walsh 码, 其码长分别为 $N = 32, 64, 128$ 。 不失一般性, 我们令水印比特数为 $R = 128$, 用户数为 $K = 16$ 。 这样就同时保证了实验的简单性和典型性。 在对水印作线性相关检测时, 我们使用的判决门限为 $\tau = 0$ 。

从图 3 的实验结果可看出, 对于高斯噪声和 JPEG 压缩来说, 在给定 PSNR 值情况下, 采用码长更长的扩频码并不能改善水印的稳健性。 这就支持了本文前面的分析, 在扩频码长增加后, 水印的嵌入强度需要下降, 导致检测误码率在两者之间的折衷。 在 (d) 图和 (h) 图中, 当 $N = 32$ 时, 因为载体图像自身的统计特性影响了水印的性能, 使得误码率比较高, 不过, 当和其他码长的情况相比误码率之间的差别并不大。 从统计意义上讲, 对于水印系统来说, 这种影响是可以忽略的。

5 结论

在无线通信中, CDMA 系统具有很多优点, 如可多址复用、容量大、保密性好、抗干扰能力强等。 通过把数字水印看作一个通信问题, 人们把 CDMA 技术引入到数字水印

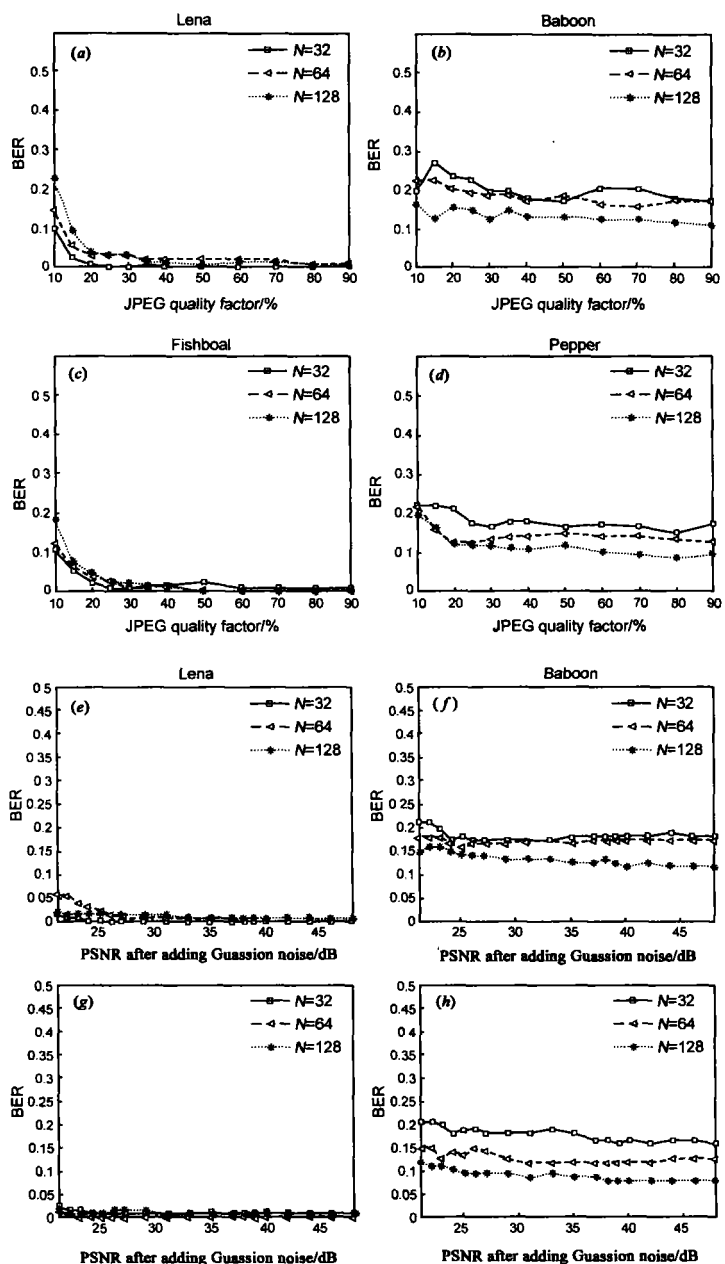


图 3 误码率和扩频码长之间的关系, PSNR 值为 40dB

中。但是, 目前基于 CDMA 扩频叠加的水印嵌入算法基本都是通过实验的方式来确定嵌入强度以及相关参数。本文的主要工作如下:

(1) 考虑到载体图像也是水印信道的组成部分, 通过在水印嵌入时把载体信息作为边信息, 本文在 CDMA 水印中充分利用载体图像的统计特性, 保证了水印嵌入的效率 (Effectiveness)。

(2) 注意到水印信道中对不可觉察性的要求 (通过 PSNR 度量), 本文分析了基于 CDMA 叠加嵌入情况下的 PSNR 值、嵌入强度参数 β 、正交码码长 N 以及用户数 K 之间的关系, 给出了关于这三者的显式表达式。得出 CDMA 水印信道中, 用户数不影响 PSNR 值的大小, 而且, 实验结

果有力的支持了这个结论。

(3)根据 PSNR 值的表达式,给出了水印嵌入强度参数 β 的估计算法,并且仿真实验的结果表明,这个估计是比较准确的;

(4)通过仔细分析 CDMA 水印信道的误码形成过程,给出了信道误码率表达式,并得出如下结论:在给定 PSNR 值的情况下,CDMA 正交扩频码码长 N 的选择不影响信道误码率值。

从通信角度研究数字水印信道的误码率特性时,需要对信道噪声模型做出合理的假设。在通信领域中,这个噪声模型一般是加性高斯白噪声(AWGN)、或者衰落。但对于数字水印,从本质上来说,每一种信号处理攻击过程都对应一个噪声模型。一般的,不同的噪声模型会导致不同的优化算法,以及不同的稳健性能衡量指标,有关内容将有待于进一步研究。

参考文献:

- [1] Cox I J, Miller M L, Bloom J A. Digital Watermarking [M]. USA: Academic Press, 1999.
- [2] HUANG JW, SHI Y Q. Reliable information bit hiding [J]. IEEE Trans on Circuits and Systems for Video Technology, 2002, 12(10): 916–920.
- [3] Sequeira Kundur D. Communication and information theory in watermarking: A survey [A]. Proceedings of SPIE [C]. Denver Colorado SPIE, 2001, 4518: 216–227.
- [4] Shuichi Shin'izu. Performance analysis of information hiding [A]. Proceedings of Security and Watermarking of Multimedia Contents IV [C]. San Jose, USA: SPIE, 2002, 4675: 421–432.
- [5] GU L M, HUANG JW, et al. Analysis of the bounds for linear block codes in watermark channel [A]. Lecture Notes in Computer Science [C]. Germany: Springer, 2004, 2971: 294–304.
- [6] Joseph JK, O'Ruanaigh, Thierry Pun. Rotation, scale and translation invariant spread spectrum digital image watermarking [J]. Signal Processing, 1998, 66(3): 303–317.
- [7] Ookubo Kohda, Shinokura K. Digital watermarking through CDMA channels using spread spectrum techniques [A]. Proc of IEEE Int Sym on Spread Spectrum Techniques and Applications [C]. Piscataway, New Jersey: IEEE, 2000, 2: 671–674.
- [8] FANG Y M, HUANG JW. Image watermarking algorithm applying CDMA [A]. Proc of IEEE Int Sym on Circuits and Systems [C]. Bangkok, Thailand: IEEE, 2003, 2(5): 948–951.
- [9] 谷利民, 方艳梅, 黄继武. 基于叠加嵌入的 CDMA 水印信道性能分析 [J]. 计算机学报, 2005, 28(2): 268–273.

GU L M, FANG Y M, HUANG JW. Performance analysis of CDMA watermarking channel using additive embedding

[J]. Chinese Journal of Computers, 2005, 28(2): 268–273 (in Chinese).

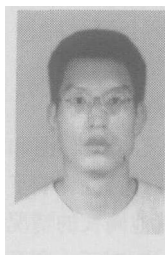
- [10] Shannon C E. Channels with side information at the transmitter [J]. IBM Journal of Research and Development, 1958, 2(10): 289–293.
- [11] Cox I J, Miller M L, McKellips A L. Watermarking as communications with side information [J]. Proceedings of the IEEE, 1999, 87(7): 1127–1141.
- [12] 刘瑞祯, 谭铁牛. 水印能量估计的一般性框架 [J]. 计算机学报, 2001, 24(3): 242–246.
- [13] 魏宗舒. 概率论与数理统计教程 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1983.
- [14] Lam E Y, Goodman J W. A mathematical analysis of the DCT coefficient distributions for images [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2000, 9(10): 1661–1666.
- [15] Simoncelli Eero P. Modeling the joint statistics of images in the wavelet domain [A]. Proc of SPIE 44th Annual Meeting [C]. Denver, Colorado: IEEE, July 1999, 3813: 188–195.
- [16] 盛骤, 谢式千, 潘承毅. 概率论与数理统计 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1989.

作者简介:

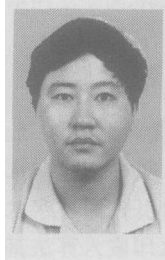


方艳梅 女, 1966年生于河北省满城县, 博士、副教授, 主要研究领域为信息隐藏与数字水印、多媒体信号处理与通信等。

E-mail: issfm@zsu.edu.cn



谷利民 男, 1975年生于山西省大同市, 博士, 主要研究领域为图像数字水印。



黄继武 男, 1962年生于广东省揭阳市, 教授、博士生导师, 主要研究领域为多媒体信息安全。