

数字水印信道中的分组码编码策略分析*

谷利民^{1,2+}, 黄继武^{1,2}

¹(中山大学 电子与通信工程系, 广东 广州 510275)

²(中山大学 信息安全技术研究所, 广东 广州 510275)

Analysis of Block Coding Strategies in Watermarking Channel

GU Li-Min^{1,2+}, HUANG Ji-Wu^{1,2}

¹(Department of Electronics, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China)

²(Institute of Information Security Technology, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China)

+ Corresponding author: Phn: +86-20-84112788, E-mail: isshjw@zsu.edu.cn, <http://www.zsu.edu.cn>

Received 2003-05-27; Accepted 2004-03-31

Gu LM, Huang JW. Analysis of block coding strategies in watermarking channel. *Journal of Software*, 2004,15(9):1413~1422.

<http://www.jos.org.cn/1000-9825/15/1413.htm>

Abstract: Robustness is one of the important requirements of digital watermark. To improve the robustness of watermarks, some algorithms proposed to apply error correcting coding (ECC) in watermarking, intending to lower the detection error rate by correcting some errors. However, there is an important difference between the watermarking channel and the conventional communication channel. Owing to the constraints of imperceptibility, the redundancy introduced by ECC will result in a decrease of embedding strength for watermarking. In other words, the coding rate of ECC affects the amplitude of embedding signal. Hence, a question arises: For improving watermark robustness, how to choose the coding rate of ECC? In this paper, this problem is addressed both analytically and experimentally. By employing Plotkin Bound and Hamming Bound, the coding rate constraints of Q -symbol linear block codes are derived. The conclusions are demonstrated by the experiment results.

Key words: digital watermark; block code; robustness

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,一些学者在水印算法中引入了纠错编码(error correcting coding, 简称 ECC),试图通过纠正水印误码来降低检测误码率。然而,水印信道与一般的通信信道不同,受水印不可察觉性的限制,纠错编码中引入的信息冗余将导致水印嵌入强度的降低。换言之,纠错码的码率会极大地影响到嵌入信号的幅度。由此将引出一个问题:从改善水印稳健性的角度出发,纠错编码的码率应该如何选择?从分析和实验两个方面探讨了这个问题。给出了 Plotkin 限和 Hamming 限情况下,水印中的 Q 进制线性分组码应该满足的码率约束条件,并通过仿真实验检验了给出的条件。

* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant Nos.60133020, 60325208, 60172067 (国家自然科学基金); the National Research Foundation for the Doctoral Program of Higher Education of China under Grant No.20020558038 (国家教育部博士点基金)

作者简介: 谷利民(1975-),男,山西大同人,博士生,主要研究领域为信息隐藏与数字水印技术;黄继武(1962-),男,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为信息隐藏与数字水印技术,多媒体信号处理。

关键词: 数字水印;分组码;稳健性

中图法分类号: TP309 文献标识码: A

由于能为数字媒体版权保护提供解决的可能性,数字水印已引起了人们的极大关注^[1,2]。尽管某些场合需要可见水印,但是,隐形水印具有更为广泛的应用。隐形水印研究的重要目标之一是在满足不可察觉性的前提下,尽可能提高水印的稳健性。

为了改善水印的稳健性,近年来,人们提出了很多提高水印稳健性的方法。已报道的典型方法有如下几类:嵌入策略的选择^[3,4]、基于 HVS/HAS(human vision system/human auditory system)模型的自适应水印算法^[5,6]、应用纠错编码(ECC)的算法^[7-11]、基于 CDMA 的方法^[12]等。

考虑到数字水印系统与通信系统的相似性,我们可以把水印问题等效为一个数字通信问题,从而应用数字通信的理论和方法来改善水印系统的稳健性^[13,14]。水印信道(watermarking channel)是高误码率信道^[15,16],而通信理论中的纠错码能够纠正信道误码。因此,一些学者把它应用到水印算法中(已应用的纠错码包括: BCH 码^[7]、卷积码^[8]、R-S 码^[9]、Turbo 码^[10]、LDPC 码^[11]等)。

然而,受不可觉察性限制,水印比特的长度和强度之间存在着折衷。另外,水印信道有较高的信道误码率(0.1~0.5)。由此,产生了如下问题:在什么情况下,纠错码能够改善水印的稳健性?哪一类编码是最合适的?码率应该如何选择?

针对这些问题,一些学者进行了研究。Huang 等人^[17]比较了重复码、BCH 码和相关检测的性能。Zinger 等人^[18]考察了水印信道中的线性分组码性能,给出了最佳编码策略。Baudry 等人^[15]研究了水印信道中 BCH 码、重复码及卷积码的性能。Balado 等人^[19]提出 Turbo 码方案对于改善水印稳健性更为有效,只要采用足够低的码率,其对抗剪切攻击的性能并不比扩频方案差。Desset 等人^[16]把水印信道看做是高噪声信道(误码率:0.1~0.5),通过分析 BCH 码和重复码的误码率分布,给出了重复码最优的误码率区间。

这些研究部分地回答了上述问题。但是,水印信道中容载(payload)与水印强度之间的矛盾没有得到充分研究。受水印不可觉察性的限制,纠错码带来的信息冗余导致水印嵌入强度的降低。换言之,纠错码的码率会影响嵌入信号的幅度。这正是水印信道和通信信道的不同之处。在一般的通信信道中,纠错码码率与信号幅度之间是互相独立的,码率的改变一般不会影响到传输信号的幅度。

本文主要研究数字水印中分组纠错码码率的选择。在我们先前的工作中,已经研究了水印嵌入强度和编码长度的关系^[20]。本文将探讨:在已知最小码距 d (或纠错能力 t)的情况、用 Plotkin 限估计纠错能力 t 的情况以及用 Hamming 限估计纠错能力 t 这 3 种情况下,对于高斯白噪声攻击,纠错码码率应该满足的下限,并且通过实验验证了这几个条件。

本文第 1 节通过分析水印信道与一般通信信道之间的区别——容载与水印嵌入强度之间的折衷,从理论上分析数字水印信道中分组码的误码性能,给出了已知纠错能力情况下、Plotkin 限情况下、Hamming 限情况下纠错码码率应该满足的约束条件。第 2 节应用前边的分析结果,进行了实验验证。第 3 节给出了本文的结论。

1 水印信道中的分组码

数字水印信道属于高误码率信道,在各种攻击下,其信道误码率一般在 0.1~0.5 之间^[16]。受不可察觉性的限制,在数字水印中纠错码的编码长度和嵌入强度之间存在着矛盾。换言之,可以通过调整纠错码码率来改变单位符号能量。这是数字水印信道与一般数字通信信道的不同之处。

1.1 数字水印信道

不失一般性,我们以图像水印算法作为分析对象。图 1 是水印系统的等效通信模型^[7]。其中,信源编码的功能是压缩水印信息 W ,用尽可能少的比特数表示 W ;信道编码的功能是纠正各种攻击(比如, JPEG 压缩、RST 变换等等)所引起的水印信道误码;水印的嵌入过程可以看做是调制过程;失真度量通过控制水印嵌入强度来保证水印的不可察觉性。水印所采用的典型线性变换一般是 DCT, DWT 等酉变换。这样,水印嵌入过程就变成了调制过

程,检测过程就相当于解调过程,它基本上是嵌入过程的逆过程.需要注意的是,这个模型中的“失真度量”模块在一般通信系统中不存在.这是本文所研究问题的起因.

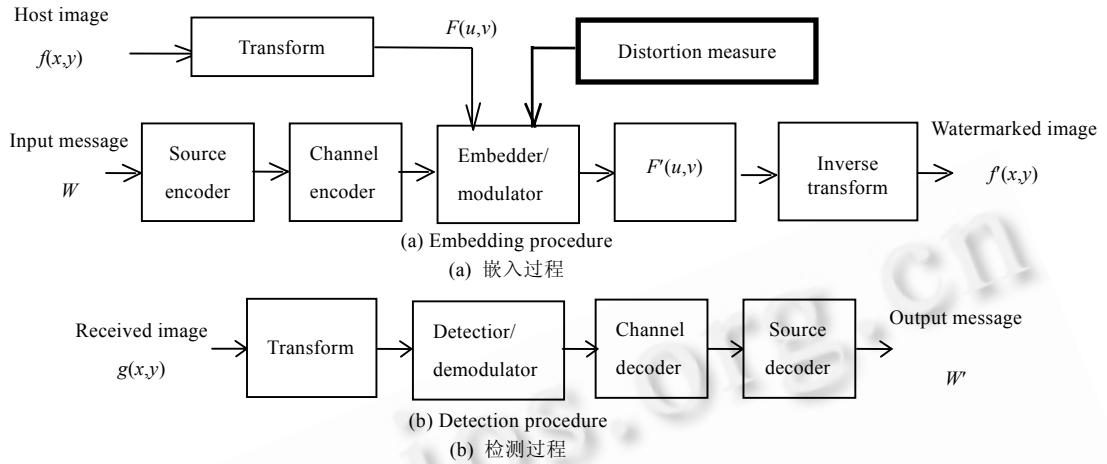


Fig.1 General communications model for digital watermarking

图 1 数字水印系统的一般通信模型

1.2 分组码的性能分析

在数字水印中,常用的嵌入模型是基于量化的模型.本文采用式(1)作为水印嵌入模型^[21],其中 y_k 和 y'_k 分别是水印嵌入前、后载体图像的变换域系数; S 表示水印的嵌入强度; mod 表示取模运算; w_k 表示嵌入的水印比特.

$$\begin{cases} y'_k = y_k - y_k \text{ mod } S + \frac{3}{4}S, & \text{if } w_k = 1 \\ y'_k = y_k - y_k \text{ mod } S + \frac{1}{4}S, & \text{if } w_k = 0 \end{cases} \quad (1)$$

不失一般性,假设信道噪声是方差为 σ^2 的高斯白噪声.根据文献[22],不难得到信道误码率为

$$p_e^u = Q\left(\frac{S}{4\sigma}\right) = Q(x) \quad (2)$$

其中, $Q(a) = \int_a^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{y^2}{2}} dy$, $x = \frac{S}{4\sigma}$.可见,对于同样功率的白噪声攻击,信道误码率只与嵌入强度 S 有关.

受不可觉察性约束,容载和水印嵌入强度存在着矛盾.令 k_1 和 k_2 , S_1 和 S_2 分别表示不同长度的容载和水印嵌入强度.若保持载体图像、变换域、嵌入模型不变,那么,如下关系成立^[20,23]:

$$S_2 = S_1 * \sqrt{\frac{k_1}{k_2}} \quad (3)$$

这意味着,容载增大将导致对应嵌入强度的减小.

本文要研究的是有限域 $GF(q)$ 上的线性分组码 $[n,k,d]$.一般来说, $q=2^m$,即将 m 个二进制比特映射到 q 个符号中的1个.此时,分组码 $[n,k,d]$ 把 $k \times 2^m$ 个二进制比特扩展为 $n \times 2^m$ 个二进制比特,相当于把水印的容载增大 $\sqrt{\frac{n}{k}}$

倍,对应的嵌入强度将减小为原来的 $\sqrt{\frac{k}{n}}$ 倍,而信道噪声不变.同样地,使用式(1)作为嵌入模型.于是,依据式(2)和式(3),则分组码 $[n,k,d]$ 的信道误码率为

$$p_e^c = Q\left(\frac{S}{4\sigma\sqrt{\frac{k}{n}}}\right) = Q\left(\frac{S}{4\sigma}\sqrt{r}\right) = Q(x\sqrt{r}) \quad (4)$$

其中,码率 $r=k/n$, x 就是式(2)中所定义的.可以看出,随着 r 的增加,信道误码率会降低.相应地,分组码解码后的误

码率为

$$p_{sig}^c = \sum_{i=1}^n \binom{n}{i} (p_e^c)^i (1-p_e^c)^{n-i} \tag{5}$$

其中,纠错位数 $t=(d-1)/2$, n 为分组码码长, p_e^c 是在式(4)中定义的.显然,式(5)右边是二项分布求和.当码长 n 较大时,二项分布可以用高斯分布较好地近似.于是,上式可以写为

$$p_{sig}^c = Q\left(\frac{t+1-np_e^c}{\sqrt{np_e^c(1-p_e^c)}}\right) \tag{6}$$

这样,在数字水印中,判断纠错码的有效性关键就在于下式能否成立:

$$p_{sig}^c - p_e^u \leq 0 \tag{7}$$

如果式(7)不成立,那么,纠错码就不能带来编码增益,换言之,它就不能改善水印的稳健性.把式(2)和式(6)代入式(7),则有

$$Q\left(\frac{t+1-np_e^c}{\sqrt{np_e^c(1-p_e^c)}}\right) - Q(x) \leq 0 \tag{8}$$

其中, p_e^c 是在式(4)中定义的.考虑到 $Q(\cdot)$ 是单调减函数,于是有

$$t+1-np_e^c \geq x\sqrt{np_e^c(1-p_e^c)} \tag{9}$$

而 $p_e^c(1-p_e^c) \leq 0.25$, 所以有

$$\left. \begin{aligned} t+1-np_e^c &\geq \frac{\sqrt{n}}{2}x \\ t+1-nQ(x\sqrt{r}) &\geq \frac{\sqrt{n}}{2}x \\ r &\geq \left(\frac{1}{x}Q^{-1}\left(\frac{t+1}{n}-\frac{x}{2\sqrt{n}}\right)\right)^2 \end{aligned} \right\} \tag{10}$$

其中, $Q^{-1}(\cdot)$ 是 Q 函数的逆函数.

这样,不等式(10)给出了水印信道中分组码码率应该满足的约束条件.从中可以看出,数字水印中纠错码码率不能任意地小.这一点反映出了水印信道与一般的通信信道之间的区别.在数字水印中引入 (n,k) 分组码,如果能够知道它的纠错位数 t (或者,最小码距 d),那么,可以直接用式(10)来判断该方案是否有效.在不能确定 t 的情况下,就需要估计该分组码的纠错位数 t .本文使用了常用的 Plotkin 限和 Hamming 限,分别用来估计低码率情况和高码率情况下的纠错位数 t ,然后,再代入式(10)来判断编码方案是否有效.

1.3 Plotkin限下的码率约束条件

由纠错码理论可知,对于低码率情况,最小码距的 Plotkin 限比较精确^[24].对 q 进制分组码应用 Plotkin 限,有

$$\begin{aligned} 2t+1 &\leq \frac{nq^{k-1}(q-1)}{q^k-1} \\ t+1 &\leq \frac{(n+1)q^k - nq^{k-1} - 1}{2(q^k-1)} \end{aligned} \tag{11}$$

我们考虑纠错能力最强的情况,即令式(11)中取“=”,并将上式代入不等式(10),得

$$r \geq \left(\frac{1}{x}Q^{-1}\left(\frac{(n+1)q^k - nq^{k-1} - 1}{2n(q^k-1)} - \frac{x}{2\sqrt{n}}\right)\right)^2 \tag{12}$$

如果信息位数 k 比较大,使得: $q^{-k} \rightarrow 0$, 那么,上式可以近似为

$$r \geq \left(\frac{1}{x} Q^{-1} \left(\frac{n+1}{2n} - \frac{1}{2q} - \frac{x}{2\sqrt{n}} \right) \right)^2 \tag{13}$$

当 $q=2$ 时,对应的纠错码是二进制分组码.此时,式(12)就可以写为

$$r \geq \left(\frac{1}{x} Q^{-1} \left(\frac{2^{k-2}}{2^k - 1} + \frac{1}{2n} - \frac{x}{2\sqrt{n}} \right) \right)^2 \tag{14}$$

当信息位数 k 比较大,使得: $2^{-k} \rightarrow 0$ 时,上式可以近似为

$$r \geq \left(\frac{1}{x} Q^{-1} \left(\frac{1}{4} + \frac{1}{2n} - \frac{x}{2\sqrt{n}} \right) \right)^2 \tag{15}$$

图 2 给出了 Plotkin 限下数字水印中二进制分组码的码率下限.码率低于图中曲线的二进制分组码将不能改善水印稳健性.可以看出,对于较大的 n ,当信噪比较高时,分组码的码率可以非常低.

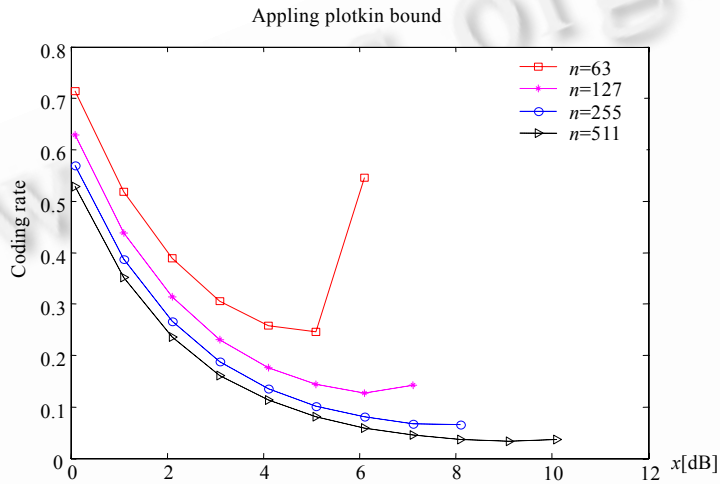


Fig.2 Coding ratio bound for binary block codes applying Plotkin bound

图 2 二进制分组码情况下应用 Plotkin 限得到的码率下限

1.4 Hamming限下的码率约束条件

由纠错码理论可知,对于较高的码率,Hamming 限比较精确^[24].对 q 进制分组码应用 Hamming 限,有

$$q^{n-k} \geq \sum_{i=0}^k \binom{n}{i} (q-1)^i \tag{16}$$

由于 $\sum_{i=0}^n \binom{n}{i} (q-1)^i = q^n$,所以,上式可以写为

$$q^{n-k} \geq q^n \sum_{i=0}^k \binom{n}{i} \left(\frac{q-1}{q} \right)^i \left(\frac{1}{q} \right)^{n-i} \tag{17}$$

$$q^{-k} \geq \sum_{i=0}^k \binom{n}{i} \left(\frac{q-1}{q} \right)^i \left(\frac{1}{q} \right)^{n-i}$$

上式的右边可以看做是二项分布的求和.同样地,对于比较大的 n ,用高斯分布来近似二项分布.于是,上式可以写为

$$q^{-k} \geq \Phi \left(\frac{t - n(q-1)/q}{\sqrt{n(q-1)/q^2}} \right) \tag{18}$$

其中, $\Phi(a) = \int_{-\infty}^a \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{y^2}{2}} dy$, 于是,

$$t+1 \leq \frac{\sqrt{n(q-1)}}{q} \Phi^{-1}(q^{-k}) + \frac{n(q-1)}{q} + 1 \tag{19}$$

其中, $\Phi^{-1}(\bullet)$ 是函数 $\Phi(\bullet)$ 的逆函数. 类似地, 我们考虑纠错能力最强的情况. 令上式取“=”, 将上式代入不等式(10), 得到:

$$r \geq \left(\frac{1}{x} Q^{-1} \left(\frac{\sqrt{n(q-1)} \Phi^{-1}(q^{-k})}{nq} + \frac{1}{n} + \frac{q-1}{q} - \frac{x}{2\sqrt{n}} \right) \right)^2 \tag{20}$$

当信息位数 k 比较大, 使得: $q^{-k} \rightarrow 0$ 时, 由不等式(18)和函数 $\Phi(\bullet)$ 的性质 ($\Phi(x) = 0, x = -4$), 近似地有

$$\frac{t - n(q-1)/q}{\sqrt{n(q-1)/q^2}} \leq -4 \tag{21}$$

$$t+1 \leq \frac{n(q-1)}{q} - \frac{4\sqrt{n(q-1)}}{q} + 1 \tag{22}$$

把式(22)代入式(10), 于是有

$$r \geq \left(\frac{1}{x} Q^{-1} \left(\frac{q-1}{q} - \frac{4\sqrt{q-1}}{q\sqrt{n}} + \frac{1}{n} - \frac{x}{2\sqrt{n}} \right) \right)^2 \tag{23}$$

当 $q=2$ 时, 对应的纠错码为二进制分组码. 此时, 式(20)可以写为

$$r \geq \left(\frac{1}{x} Q^{-1} \left(\frac{\Phi^{-1}(2^{-k})}{2\sqrt{n}} + \frac{1}{2} + \frac{1}{n} - \frac{x}{2\sqrt{n}} \right) \right)^2 \tag{24}$$

当信息位数 k 比较大, 使得 $2^{-k} \rightarrow 0$ 时, 上式可简化为

$$r \geq \left(\frac{1}{x} Q^{-1} \left(\frac{1}{2} - \frac{2}{\sqrt{n}} + \frac{1}{n} - \frac{x}{2\sqrt{n}} \right) \right)^2 \tag{25}$$

图 3 给出了 Hamming 限下数字水印中二进制分组码的码率下限. 码率低于图中曲线的二进制分组码将不能改善水印稳健性. 类似地, 可以看到, 对于较大的 n , 当信噪比较高时, 纠错码码率可以非常低.

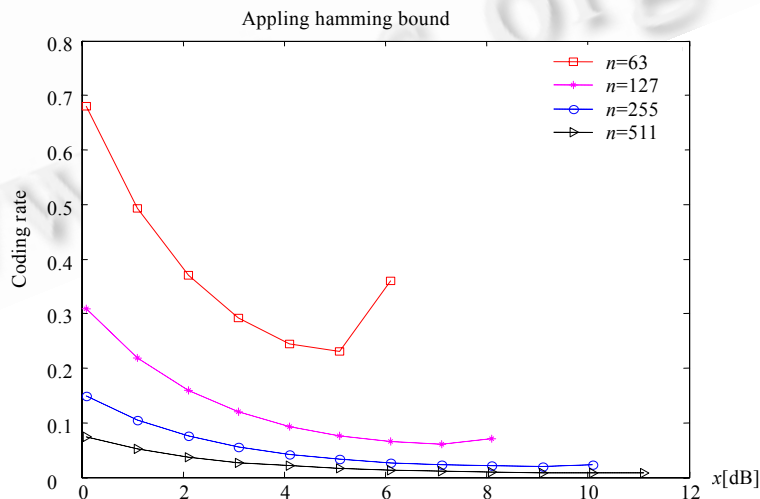


Fig.3 Coding ratio bound for binary block codes applying Hamming bound

图 3 二进制分组码情况下应用 Hamming 限得到的码率下限

2 码率约束条件的应用与结果分析

对于数字水印来说,由于受到不可觉察性的限制,容载与水印嵌入强度之间存在着矛盾.对于同样的水印信息,不同编码方案将导致不同大小的容载,从而直接影响着嵌入强度的大小.这意味着,在数字水印中,纠错码码率的选取极大地影响着水印信号的幅度,低码率的编码方案会带来低的水印嵌入强度.

为了验证前面导出的码率约束条件,本文采用了 64bit 的水印信息,对如下两类方案的误码率作了比较.本文实验使用了式(1)作为水印嵌入模型,分别使用 256×256 的灰度图像“Lena”,“baboon”,“fishboat”和“pepper”作为载体图像,8×8DCT 变换的中频系数作为水印嵌入频带.通过调整嵌入强度的大小,使得各个编码方案基本上有相同的 PSNR(大约 44db).

(1) 使用分组码的方案.采用的分组码包括二进制和非二进制码.在检测时,使用“硬判决”得到每个比特,然后,进行纠错译码,得到水印信息.由于纠错码引入的冗余,该方案一般有比较低的嵌入强度.这些方案的码率选择策略是:对于低码率情况,选择低于式(15)界限的分组码;对于高码率情况,选择低于式(25)界限的分组码.这样,在理论上,这些分组码的方案将不能带来编码增益.本文将用仿真实验来验证这一点.

(2) 不使用编码的方案.嵌入和检测基本上和前一个方案相同,只是没有了其中的编码和解码环节.与前一类方案相比,该方案有相对较小的容载,从而拥有较大的嵌入强度.

2.1 二进制分组码的应用

很二进制分组码都是用来纠正随机错误的.在数字水印中,常见的二进制码是:重复码、BCH 码及它们的级联码.本文实验采用了不同码长的 BCH 码:BCH(63,16),BCH(127,36).依据文献[24]可知:对于 BCH(63,16)来说,其最小码距为 23, $\frac{d}{2n} = \frac{23}{2 \times 63} = 0.1825 \geq 0.156$,属于低码率、强纠错能力的码,应用 Plotkin 限比较精确;对于

BCH(127,36)来说,其最小码距为 31, $\frac{d}{2n} = \frac{31}{2 \times 127} = 0.1220 < 0.156$,属于高码率、低纠错能力的码,应用 Hamming

限比较精确.对于 BCH(63,16)来说,码率约为 0.254 0.从图 2 可以看出,低信噪比时其码率基本上低于给定的界限;对于 BCH(127,36)来说,码率约为 0.283 5,从图 3 可以看出,低信噪比时其码率基本上低于给定的界限.换言之,依据前面的分析,它们的性能会比不编码方案的差.从图 4 可以看出,这两种编码的性能确实比不编码的情况差(限于篇幅,本文只报道“Lena”和“baboon”图像的实验结果,其他两个图有类似的结论).

2.2 多进制分组码的应用

在各种多进制分组码中,RS 码是有重要应用价值的一种,也是在数字水印中,常见的多进制分组码.本文实验采用了不同码长的 RS 码:RS(15, 5)和 RS(31, 9).

对于 RS(15,5)来说^[22],其最小码距为 11,依据文献[24]可知, $\frac{d}{2n} = \frac{11}{2 \times 15} = 0.3667 \geq 0.156$,属于低码率、强纠

错能力的码,应用 Plotkin 限比较精确;对于 RS(31,9)来说^[22],其最小码距为 23,依据文献[24]可知, $\frac{d}{2n} = \frac{23}{2 \times 31} = 0.3710 \geq 0.156$,属于低码率、强纠错能力的码,应用 Plotkin 限比较精确.对于 RS(15,5)来说,相当

于二进制情况下码长为 60、码率约为 0.254 0 的码,从图 2 可以看出,低信噪比时其码率基本上低于给定的界限;对于 RS(31,9)来说,相当于二进制情况下码长为 155、码率约为 0.283 5 的码,从图 2 可以看出,低信噪比时其码率基本上低于给定的界限.换言之,依据前面的分析,它们的性能会比不编码方案的差.从图 5 可以看到,这两种编码的性能确实比不编码的情况差(限于篇幅,本文只报道“Lena”和“baboon”图像的实验结果,其他两个图有类似的结论).

3 结 论

稳健性是数字水印最重要的性能之一.采用类扩频的方法不足以保证水印的稳健性,通过把数字水印等效为一个通信问题,一些学者在水印算法中引入了纠错编码,试图通过纠正水印误码来提高水印稳健性.然而,一

个被忽略的事实是:受水印不可察觉性的限制,纠错编码中引入的信息冗余将降低水印嵌入强度.换言之,纠错码码率和信号幅度之间可以相互转换.这一点,正是水印信道与一般的通信信道的不同之处.在一般的通信信道中,纠错码码率与信号幅度之间是互相独立的,码率的改变一般不会影响到信号的幅度.

基于这一点,本文从通信理论的角度,分析了水印信道中分组码的误码率,提出了二进制和 q 进制($q>2$)分组码的有效性条件,并且通过实验进行了验证.

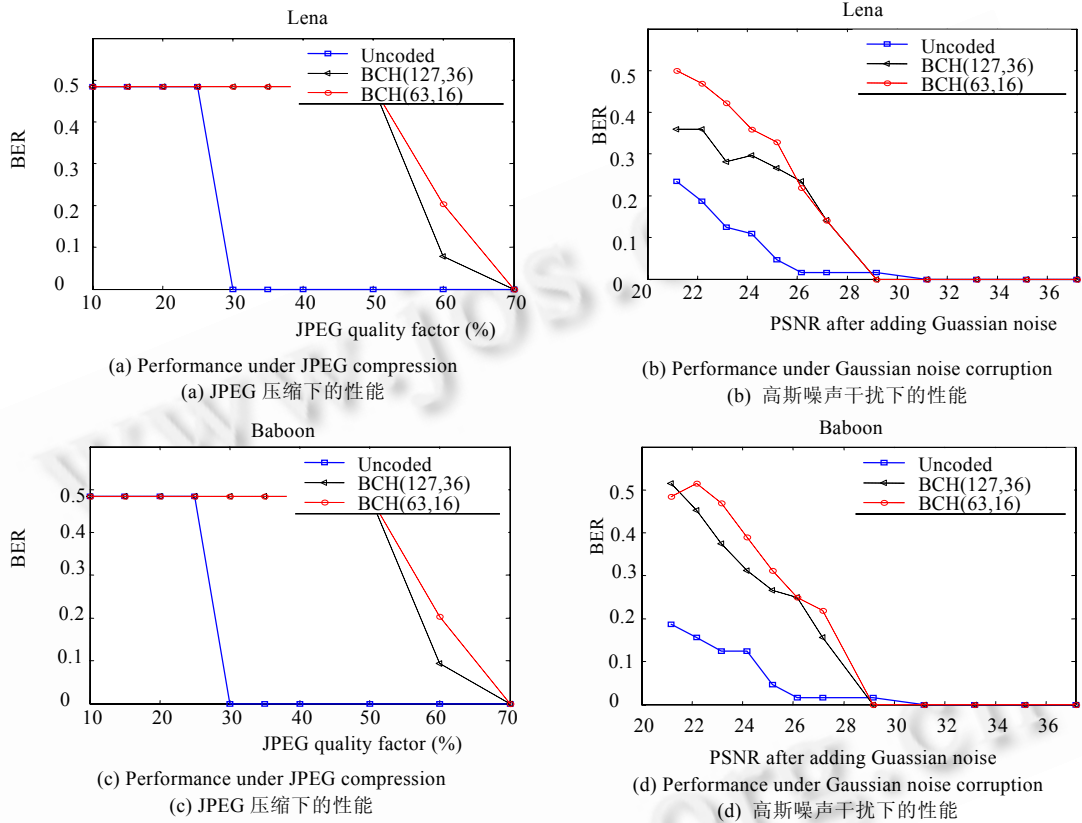


Fig.4 Testing BCH coding ratio bounds: (a),(b) using Lena image; (c),(d) using Baboon image

图4 验证 BCH 码的码率界限:(a)(b)为 Lena 图像的结果;(c)(d)为 Baboon 图像的结果

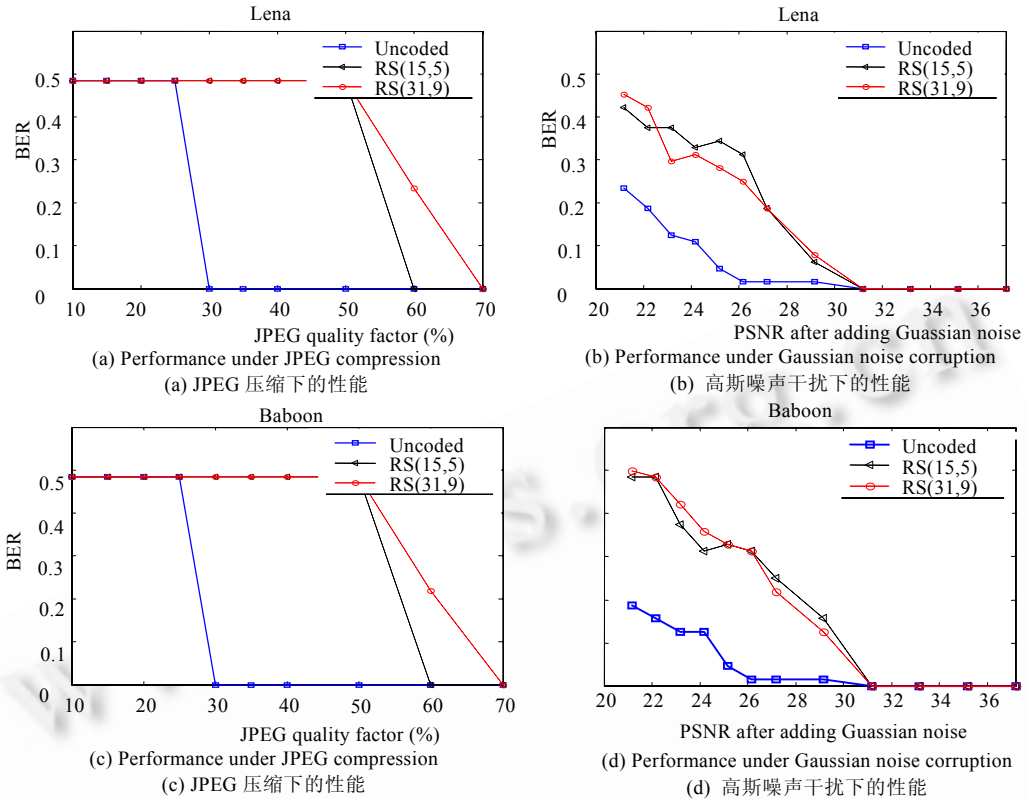


Fig.5 Testing RS coding ratio bounds: (a),(b) using Lena image; (c),(d) using Baboon image

图 5 验证 RS 码的码率界限:(a),(b)为 Lena 图像的结果;(c),(d)为 Baboon 图像的结果

References:

- [1] Peticolas FAP, Anderson RJ, Kuhn MG. Information hiding—A survey. Proc. of the IEEE, 1999,87(7):1062~1078.
- [2] Podilchuk CI, Delp EJ. Digital watermarking: Algorithm and application. IEEE Signal Processing Magazine, 2001,18(4):33~46.
- [3] Cox J, Miller ML, McKellips AL. Watermarking as communications with side information. Proc. of the IEEE, 1999,87(7):1127~1141.
- [4] Huang JW, Shi YQ, Shi Y. Embedding image watermarks in DC components. IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology, 2000,10(6):974~979.
- [5] Podilchuk CI, Zeng WJ. Image-Adaptive watermarking using visual models. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1998,16(4):525~539.
- [6] Huang JW, Shi YQ. An adaptive image watermarking scheme based on visual masking. Electronics letters, 1998,34(8):748~750.
- [7] Huang JW, Sh YQi. Reliable information bit hiding. IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology, 2002,12(10):916~920.
- [8] Pérez-González F, Hernández JR, Felix B. Approaching the capacity limit in image watermarking: A perspective on coding techniques for data hiding applications. Signal Processing, 2001,81(6):1215~1238.
- [9] Wu C-F, Hsieh W-S. Image refining technique using watermarking. IEEE Trans. on Consumer Electronics, 2000,46(1):1~5.
- [10] Pereira S, Voloshynovskiy S, Pun T. Effective channel coding for DCT watermarking. In: Proc. of the IEEE Int. Conf. on Image Processing, Vancouver: IEEE Press, 2000,3:671~673.
- [11] Davey MC, MacKay DJC. Reliable communication over channels with insertions, deletions, and substitutions. IEEE Trans. on Information Theory, 2001,47(2):687~698.

- [12] Fang YM, Huang JW, Shi YQ. Image watermarking algorithm applying CDMA. In: Proc. of the IEEE Int. Sym. on Circuits and Systems. Bangkok: IEEE Press, 2003,2:948~951.
- [13] Joseph JK, Dowling WJ. Rotation, scale and translation invariant spread spectrum digital image watermarking. Signal Processing, 1998,66(3):303~317.
- [14] Steinberg Y, Merhav N. Identification in the presence of side information with application to watermarking. IEEE Trans. on Information Theory, 2001,47(4):1410~1422.
- [15] Baudry S, Delaigle JF, Sankur B, Macq B, Maitre H. Analysis of error correction strategies for typical communication channels in watermarking. Signal Processing, 2001,81(6):1239~1250.
- [16] Desset C, Macq B, Vandendorpe L. Block error-correcting codes for systems with a very high BER: Theoretical analysis and application to the protection of watermarks. Signal Processing: Image Communication, 2002,17(5):409~421.
- [17] Huang JW, Elmasry GF, Shi YQ. Power constrained multiple signaling in digital image watermarking. In: Proc. of the IEEE Workshop on Multimedia Signal Processing. Piscataway: IEEE Press, 1998. 388~393.
- [18] Zinger S, Jin Z, Maitre H, Sankur B. Optimization of watermarking performances using error correcting codes and repetition. In: Proc. of the Communications and Multimedia Security. Kluwer, 2001. 229~240.
- [19] Balado F, Perez-Gonzalez F, Scalise S. Turbo coding for sample-level watermarking in the DCT domain. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Image Processing, Vol.3. Piscataway: IEEE Press, 2001. 1003~1006.
- [20] Gu LM, Huang JW, Shi YQ. Analysis of the role played by error correcting coding in robust watermarking. In: Proc. of the IEEE Int'l Symp. on Circuits and Systems, Vol.3. Piscataway: IEEE Press, 2003. 798~801.
- [21] Tsai MJ, Yu KY, Chen YZ. Joint wavelet and spatial transformation for digital watermarking. IEEE Trans. on Consumer Electronics, 2000,46(1):241~245.
- [22] Cao ZG, Qian YS. Principle of Modern Communications. Beijing: Tshinghua University Press, 1992. 231~366 (in Chinese).
- [23] Liu RZ, Tan TN. A general watermarking framework for optimal energy estimation. Chinese Journal of Computers, 2001,24(3): 242~246 (in Chinese with English abstract).
- [24] Wang XM, Xiao GZ. Error Correcion Codes: Principle and Methods. Xi'an: Xi'dian University Press, 1992. 86~90 (in Chinese).

附中文参考文献:

- [22] 曹志刚,钱亚生.现代通信原理.北京:清华大学出版社,1992.231~366.
- [23] 刘瑞祯,谭铁牛.水印能量估计的一般性框架.计算机学报,2001,24(3):242~246.
- [24] 王新梅,肖国镇.纠错码——原理与方法.西安:西安电子科技大学出版社,1991.86~90.