

适用于灰度级信号的数据嵌入方法

张卫明^{1,2}, 张新鹏¹, 王朔中¹

(1. 上海大学 通信与信息工程学院, 上海 200072 2 信息工程大学 信息工程学院, 河南 郑州 450002)

摘要: 针对灰阶信号载体, 研究了高效数据嵌入方法。利用二元隐写编码和湿纸编码, 对 ± 1 隐写提出了双层嵌入方法, 证明了只要二元隐写码达到二元隐写的嵌入率上界, 则对应的双层嵌入可达到 ± 1 隐写的嵌入率上界。进一步对 ± 2 隐写提出了三层嵌入方法, 分析了三层嵌入与嵌入率理论上界的距离, 分析结果表明, 将双层嵌入和三层嵌入组合即可得到近似最优的 ± 2 隐写方法。

关键词: 隐写码; 矩阵编码; 湿纸码; 嵌入率; 最大平均失真

中图分类号: TP309 **文章编号:** 1005-9830(2008)02-0209-05

Methods for Embedding Data in Gray-scale Signals

ZHANG Weiming², ZHANG Xin-peng¹, WANG Shuo-zhong¹

(1. School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

(2. Institute of Information Engineering, Information Engineering University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Efficient methods for embedding data in gray-scale signals are presented. By using binary steganographic codes and wet paper codes, a "double layered" embedding scheme for ± 1 steganography is proposed. It is proved out that the corresponding "double layered" embedding can achieve the upper bound of ± 1 steganography if the binary stego code reaches the upper bound on embedding rate of binary steganography. A "triple layered" embedding scheme for ± 2 steganography is presented. The distance between the "triple layered" embedding and the upper bound is analysed. The results show that the near optimal embedding schemes for ± 2 steganography can be obtained by combining "double layered" and "triple layered" embedding methods.

Key words: steganographic codes; matrix coding; wet paper codes; embedding rate; maximum average distortion

如何以最小的失真代价在载体中嵌入尽可能多的信息是隐写术 (steganography) 所关注的核心问题之一, 针对这一问题的编码方法称之为隐写

码。近几年, 隐写码已成为信息隐藏领域的一个研究热点。Cranda^[1] 最早提出了矩阵编码方法, 这一方法后来被用到了著名的 $T5^{[2]}$ 算法中。矩阵编

收稿日期: 2007-05-14 修回日期: 2008-01-23

基金项目: 国家自然科学基金 (60502039 60773039); 国家 "863" 计划 (2007AA01Z477); 中国博士后科学基金 (20070420096)

作者简介: 张卫明 (1976-) 男, 河北定州人, 讲师, 博士, 主要研究方向: 密码学和信息隐藏, E-mail: zwmshu@gmail.com

码事实上是应用线性覆盖码 (covering codes) 的一个特例, Galand 和 Kabatjansk^[3] 分析了隐写码和线性覆盖码的关系。之后, 众多基于二元覆盖码的隐写码被提出, 如文献 [4-6]。最近, Fridrich 等^[7] 基于低密度生成矩阵 (LDGM) 码构造了一种隐写码, 其性能可接近二元隐写码性能的理论界, 即对给定的嵌入率可几乎达到最小可能的失真。

上述二元隐写码只适于在灰度级信号的最不重要比特位 (LSB) 中嵌入信息, 即需要首先将载体信号映射成二元载体。LSB 嵌入对每个载体符号灰度值的最大修改幅度 $f=1$, 每个符号也最多只能承载 1 比特信息。事实上, 在限定最大修改幅度 $f=1$ 的条件下, 可以通过选择加 1 或减 1, 使每个符号承载一个三进制消息, 即 $\log_2 3$ 比特信息。Willm 等^[8] 对一般的修改幅度限制 $f=1, 2, \dots, \infty$, 研究了嵌入性能的理论界, 并且对 $f=1$ 的情况, 建议使用三元 Hamming 码和 3 元 Golay 码获得较优的嵌入性能。文献 [9] 和 [10] 独立提出了一种基于图着色的方法, 该方法包含三元 Hamming 码为子集。

本文结合使用二元隐写码和湿纸码^[11] 对最大修改幅度 $f=1$ 和 $f=2$ 的情况, 分别提出了双层和三层嵌入方案。该方法不仅优于以前的方法, 而且可证明其性能接近理论界, 几乎达到最优。

1 记号和准备

本文中, 承载信息的载体是灰度级信号序列, 记作 $X^N = (x_1, \dots, x_N)$ 其中, $x_i \in \{0, 1, \dots, 2^B - 1\}$, $i=1, 2, \dots, N$ B 是一个正整数, 例如对于 256 级灰度图像, $B=8$ 。每个符号 x 都可以用 B 个比特表示为 $x = \sum_{j=0}^{B-1} b_j 2^j$ 用 $L(x)$ 表示 x 的最不重要比特位 (LSB) b_0 并用 $S(x)$ 表示次不重要比特位 (次 LSB) b_1 , $T(x)$ 表示第三不重要比特位 (第三 LSB) b_2 。要嵌入的消息是二元序列 $m_1^L = (m_1, \dots, m_N)$, 一般 m_1^L 是加密后的伪随机序列。假设消息序列与载体的 LSB 层、次 LSB 层和第三 LSB 层独立。

一个数据嵌入系统利用一个嵌入函数 g 将消息 m_1^L 嵌入到载体 X^N 中生成载密序列 $Y^N = (y_1, \dots, y_N)$

$$Y^N = g(X^N, m_1^L) \tag{1}$$

另外有一个对应的提取函数 h 可从 Y^N 中提取出

消息 m_1^L 即

$$m_1^L = h(Y^N) = h(g(X^N, m_1^L)) \tag{2}$$

由每个隐写码都可以得到这样一个嵌入系统。

消息嵌入过程需要对载体作修改, 但是这种修改不能引起过大的失真。若限定每个灰度值的最大修改幅度为 f , f 是一个正整数, 则 $Z = x + z$, $Z \in \mathcal{Z} = \{-f, -f+1, \dots, +f\}$, 即对每个载体符号允许作的修改值都属于 \mathcal{Z} 。定义失真度量 $D(z)$, 一般采用平方失真, 即 $D(z) = z^2$, 则载体序列的失真定义为 $d(X^N, Y^N) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N D(y_i - x_i)$ 。对于上述数据嵌入过程, 定义最大平均失真

$$D_* = \max_{X^N, m_1^L} \sum_{m_1^L} P\{m_1^L\} d(X^N, Y^N) \tag{3}$$

并定义嵌入率 R 为嵌入消息的长度与载体长度的比, 即 $R = L/N$ 。笔者希望数据嵌入方法能对给定的嵌入率达到尽可能小的平均失真。文献 [8] 对于设定的修改幅度 f 和最大平均失真限制 Δ 证明了嵌入率满足上界:

$$f(\Delta) = \max_{\{P_z : \sum_{z \in \mathcal{Z}} P_z \leq \Delta\}} H(Z) \tag{4}$$

式中 $\{P_z : z \in \mathcal{Z}\}$ 是修改幅度值 $\mathcal{Z} = \{-f, -f+1, \dots, +f\}$ 的概率分布。

本文的目的是分别对 $f=1$ 和 $f=2$ 的情况, 设计可接近上界 (4) 的嵌入方法。

2 双层嵌入

本节针对最大修改幅度 $f=1$ 的情况设计一个双层嵌入方案。第一层嵌入是选择一个二元隐写码在载体的 LSB 层 $L(x)_1^N = (L(x_1), \dots, L(x_N))$ 嵌入信息。设该二元隐写码对应的嵌入算法为 g , 其嵌入率为 R 则平均可嵌入 RN 比特信息 $m_1^{RN} = (m_1, \dots, m_{RN})$

$$g(L(x)_1^N, m_1^{RN}) \tag{5}$$

嵌入过程中, 如果 $L(x)$ 需要修改, 则对 x 加 1 或减 1。设嵌入算法 g 的最大平均失真为 D_* , 在平方失真度量下, $D_* = P(1) + P(-1)$, 即为载体的修改概率。所以平均有 $D_* N$ 个载体符号被修改。为了描述方便且不失一般性, 假设 RN 和 $D_* N$ 都是整数, 而且恰好可以通过修改 $D_* N$ 个载体符号嵌入 RN 比特信息。

注意当 LSB 位 $L(x)$ 需要修改时, $x+1$ 或 $x-1$ 都会将 $L(x)$ 翻转, 但是 $x+1$ 和 $x-1$ 对 x 的次 LSB 位 $S(x)$ 的影响却不同。具体而言, 当

x_i 是偶数时, x_{i+1} 保持 $S(x_i)$ 不变, 而 x_{i-1} 可将 $S(x_i)$ 翻转; 当 x_i 是奇数时, x_{i+1} 将 $S(x_i)$ 翻转, 而 x_{i-1} 保持 $S(x_i)$ 不变。上面的嵌入过程中有 $D_* N$ 个载体符号的 LSB 位需要修改, 可以通过选择加 1 或减 1 来同时自由控制这 $D_* N$ 个符号的次 LSB 位, 从而进行第二层信息嵌入。

第二层嵌入时, 使用湿纸码在次 LSB 层 $S(x)_i^N = (S(x_1), \dots, S(x_N))$ 嵌入信息。湿纸码可以在载体的某些位置被限制修改的情况下嵌入信息。对湿纸码而言, 称不能修改的载体位置为“湿的”, 可以修改的部分为“干的”。设 (b_1, \dots, b_N) 是一个二元载体序列, 其中有 k 个元素是干的, 而另外 $n-k$ 个是湿的, 则利用文献 [11] 中的湿纸码, 可以在 (b_1, \dots, b_N) 中嵌入 k 比特信息, 而接收者不需要知道那些位置是湿的就可以成功提取这 k 比特信息。对应到本文问题, 在第一层嵌入中, 有 $D_* N$ 个载体符号的次 LSB 位可以自由变动, 限制其他 $D_* (1-N)$ 个次 LSB 位不可变动, 即在次 LSB 层 $S(x)_i^N = (S(x_1), \dots, S(x_N))$ 中有 $D_* N$ 个干的位置和 $D_* (1-N)$ 个湿的位置。用一个湿纸编码算法 W 可以在次 LSB 层嵌入另外 $D_* N$ 比特信息 $m_{RN+1}^{(R+D_*)N} = (m_{RN+1}, \dots, m_{(R+D_*)N})$

$$W(S(x)_i^N, m_{RN+1}^{(R+D_*)N}) \quad (6)$$

上述嵌入过程若遇到载体灰度值饱和时 (即 $x_i=0$ 或 2^B-1), 可能需要特殊处理。例如, $x_i=0$ 只有 x_{i+1} 是允许的, 若在第一层嵌入时 $L(x_i)$ 需要变动, 并且第二层嵌入需要选择 x_{i-1} 来变动 $S(x_i)$, 则上述过程将无法执行, 对于这种情况, 可在使用湿纸码时限定 x_i 的次 LSB 位也为湿的, 这样第二层嵌入会损失一些嵌入量。但是因为这种情况发生的概率很小, 所以对整体嵌入率的影响可忽略不计。

综上, 双层嵌入具有如下性质:

性质 1 如果第一层嵌入使用的二元隐写码的最大平均失真为 D_* , 嵌入率是 R 则对应的双层嵌入的最大平均失真仍然是 D_* , 而嵌入率增长为 $R+D_*$ 。

例如, 文献 [2] 中使用的矩阵编码, 即二元 Hamming 码, 可以在 2^k-1 长的二元载体上通过至多修改其中一个来嵌入 k 比特信息, 修改概率为 $(2^k-1)/2^k$, 所以最大平均失真为 $1/2^k$, 嵌入率为 $k/(2^k-1)$ 。因而, 在双层嵌入体制中使用二元 Hamming 码可以以最大平均失真 $1/2^k$ 达到嵌入率 $k/(2^k-1)+1/2^k$ 。

由于充分利用了湿纸编码的特点, 第二层嵌入在不需引入修改的情况下, 额外嵌入了部分信息, 所以与以前的方法比, 双层嵌入可以用相对小的失真代价达到更高的嵌入率。文献 [8] 建议, 当最大修改幅度 $f=1$ 时, 可通过载体灰度值模 3 将其影射成三进制载体, 从而使用三元 Hamming 文献 [9] 和 [10] 的方法实际上包含了三元 Hamming 该方法可以在 d 长的一段灰度级信号上嵌入 $\log_2(2d+1)$ 比特信息, 至多修改 1 个, 修改概率是 $2^d/(2d+1)$, 所以其最大平均失真为 $2/(2d+1)$, 嵌入率为 $\log_2(2d+1)/d$ 。由图 1 可看出, 使用二元 Hamming 码的双层嵌入方案大大提高了二元 Hamming 码本身的嵌入性能, 并且要优于文献 [9] 和 [10] 的方法。另外, 还有很多性能优良的二元隐写码^[4,5] 可用于双层嵌入, 以得到更好的嵌入方案。

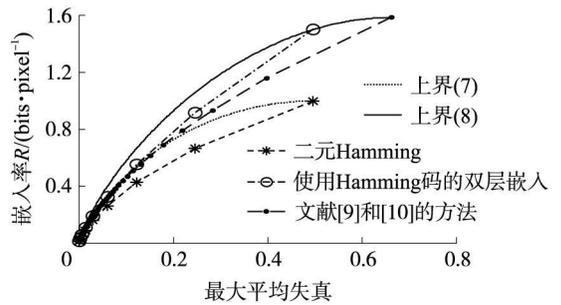


图 1 双层嵌入的性能

现在来说明只要所用的二元隐写码是最优的, 则双层嵌入方案对于 $f=1$ 的情况是最优的。对给定的最大平均失真 Δ 二元隐写码的嵌入率有如下上界^[6]:

$$r(\Delta) = \begin{cases} H(\Delta) & \Delta \leq \frac{1}{2} \\ 1 & \Delta > \frac{1}{2} \end{cases} \quad (7)$$

式中 $H(y) = -y \log_2 y - (1-y) \log_2 (1-y)$ 是二元熵函数。文献 [8] 证明了当 $f=1$ 时, 上界 (4) 有如下解:

$$f(\Delta) = \begin{cases} H(\Delta) + \Delta & \Delta \leq \frac{2}{3} \\ \log_2 3 & \Delta > \frac{2}{3} \end{cases} \quad (8)$$

比较界 (7) 和 (8) 并由性质 1 易知, 只要一个二元隐写码达到上界 (7), 则应用此二元隐写码得到的双层嵌入体制可达到上界 (8)。例如上述二元 Hamming 码取 $k=1$ 时, 最大平均失真是 $1/2$ 嵌入率为 1, 达到了上界 (7), 所以对应的双层嵌入可以达到上界 (8) 即最大平均失真为 $1/2$ 嵌入

率为 1.5 这也是双层嵌入适用的最大嵌入率(见图 1)。最近,文献[7]中的结果表明,基于低密度生成矩阵(LDGM)码得到的隐写码,可几乎达到界(7)所以在双层嵌入方案中应用基于 LDGM 码的隐写码可接近界(8)。

3 三层嵌入

下面我们针对最大修改幅度 $f=2$ 的情况,设计三层嵌入方案。此时可能的修改幅度值为 $\mathbb{Z} = \{-2, -1, 0, +1, +2\}$ 。设修改幅度为 1 的概率为 P_1 , 即 $P_1 = P_{1+} + P_{1-}$, 修改幅度为 2 的概率为 P_2 , 即 $P_2 = P_{2+} + P_{2-}$, $P_0 + P_1 + P_2 = 1$ 。

第一层嵌入仍然是用二元隐写码在载体的 LSB 层 $L(x)_1^N = (L(x_1), \dots, L(x_N))$ 嵌入信息,采用加 1 或减 1 的修改方式,修改概率为 P_0 。因为基于 LDGM 的二元隐写码可几乎达到上界(7),所以为了描述方便,假设所用到的二元隐写码是最优的,即当最大平均失真为 D_* , 嵌入率为 $H(D_*)$ 。对于二元隐写码,最大平均失真就等于修改概率,所以第一层嵌入的嵌入率为 $H(P_0)$ 。

第二层嵌入使用二元隐写码在载体的次 LSB 层 $S(x)_1^N = (S(x_1), \dots, S(x_N))$ 嵌入信息。第一层嵌入平均需要对 $P_1 N$ 个 LSB 位修改,不失一般性,假设 $P_1 N$ 为整数,且刚好有 $P_1 N$ 个位置需修改。修改时通过选择加 1 或减 1 可以自由选择这 $P_1 N$ 个灰度值的次 LSB 位。 $S(x)_1^N$ 中的另外 $(1-P_1)N$ 个位置如需要修改,可通过对灰度值加 2 或减 2 来实现,若修改幅度为 2 的概率为 P_2 则整个次 LSB 层的修改概率为 $P_2/(1-P_1)$,所以在位平面 $S(x)_1^N$ 上的嵌入率为 $H(P_2/(1-P_1))$ 。

第三层嵌入使用湿纸码在载体的第三 LSB 层 $T(x)_1^N = (T(x_1), \dots, T(x_N))$ 嵌入信息。第二层嵌入平均需要对 $P_2 N$ 个灰度值进行加、减 2 操作,仍假设 $P_2 N$ 为整数,且刚好有 $P_2 N$ 个位置需要加、减 2 通过选择加 2 或减 2 可以自由选择这 $P_2 N$ 个灰度值的第三 LSB 位。限定 $T(x)_1^N$ 中其他 $(1-P_2)N$ 个位置不能变动,则用湿纸码可在 $T(x)_1^N$ 上以嵌入率 P_2 嵌入信息。

三层嵌入方案在遇到载体灰度值饱和时也需要特殊处理。例如, $x=0$ 在第一层嵌入时 x 需要变动,并且第二层嵌入需要选择 $x-1$ 但 $x-1$ 不被允许,此时选 $x+3$ 来同时变动 x 的 2 个低位比特,这会带来更大的嵌入损失,但因其发生概

率一般很小,所以对总体平均失真的影响可忽略不计;另外类似双层嵌入的情况,第三层湿纸编码也会因灰度值饱和损失一些嵌入量,但其对总体嵌入率的影响也可忽略。

综上,三层嵌入方案的嵌入率为 $H(P_0) + H(P_2/(1-P_1)) + P_2$, 最大平均失真为 $D_* = P_0 \times 1 + P_2 \times 2^2 = P_0 + 4P_2$ 。对于给定的最大平均失真限制 Δ 三层嵌入方案的嵌入率为

$$\max_{\{P_0, P_2: P_0 + 4P_2 \leq \Delta\}} H(P_0) + H\left(\frac{P_2}{1-P_1}\right) + P_2 \quad (9)$$

下面分析上述三层嵌入方案的性能与上界(4)的距离。 $f=2$ 时式(4)为

$$f(\Delta) = \max_{\{P_0, P_1, P_2, P_{1+}, P_{1-}, P_{2+}, P_{2-}\}: (P_0 + P_{1+} + P_{1-}) + 4(P_{2+} + P_{2-}) \leq \Delta} H(P_0, P_{1+}, P_{1-}, P_{2+}, P_{2-}) \quad (10)$$

目标熵函数 $H(P_0, P_{1+}, P_{1-}, P_{2+}, P_{2-}) = -\sum_{z=-2}^{+2} P_z \log_2 P_z$ 为极大化这个熵函数,考虑分布 $\{P_z, z \in \{-2, -1, 0, +1, +2\}\}$:

$$P_z = \frac{\exp(-\alpha z)}{\beta} \quad (11)$$

式中: $\alpha > 0$ 为一实数, $\beta = \sum_{z=-2}^{+2} \exp(-\alpha z)$, $\sum_{z=-2}^{+2} P_z z = \Delta$ 则对任一满足 $\sum_{z=-2}^{+2} P_z z \leq \Delta$ 的分布 $\{P_z, z \in \{-2, -1, 0, +1, +2\}\}$, 都有

$$\sum_{z=-2}^{+2} P_z \ln \frac{1}{P_z} = \sum_{z=-2}^{+2} P_z \ln(\beta \exp(\alpha z)) = \ln \beta + \alpha \sum_{z=-2}^{+2} P_z z \leq \ln \beta + \alpha \Delta \quad (12)$$

又注意到相对熵 $\sum_z P_z \ln(P_z/P_z^*) \geq 0$ 所以 $\sum_z P_z$

$$\ln(P_z^*/P_z) \leq 0$$

所以下面的熵(单位为奈特)满足:

$$\sum_{z=-2}^{+2} P_z \ln \frac{1}{P_z} = \sum_{z=-2}^{+2} P_z \ln \frac{P_z^*}{P_z} + \sum_{z=-2}^{+2} P_z \ln \frac{1}{P_z^*} \leq \ln \beta + \alpha \Delta \quad (13)$$

上式等号成立当且仅当 $\{P_z\}$ 与 $\{P_z^*\}$ 同分布。所以分布 $\{P_z^*\}$ 是达到上界(10)的最优分布。

令 $P_1^* = P_{1+}^* + P_{1-}^*$, $P_2^* = P_{2+}^* + P_{2-}^*$, 则 $P_{1+}^* = P_{1-}^* = P_1^*/2$, $P_{2+}^* = P_{2-}^* = P_2^*/2$ 。由熵的递增性,上界(10)可表示为:

$$H(P_0^*, P_{1+}^*, P_{1-}^*, P_{2+}^*, P_{2-}^*) = H\left(P_0^*, \frac{P_1^*}{2}, \frac{P_1^*}{2}, \frac{P_2^*}{2}, \frac{P_2^*}{2}\right) = H(P_0^*, P_1^*, P_2^*) + P_1^* + P_2^* = H(P_0^*) + (1-P_0^*) \cdot \left[H\left(\frac{P_2^*}{1-P_1^*}\right) + P_1^* + P_2^* \right] = H(P_0^*) + H\left(\frac{P_2^*}{1-P_1^*}\right) + P_1^* + P_2^*$$

$$R_2 + R_1 \left[1 - H \left(\frac{R_2}{1 - R_1} \right) \right] \quad (14)$$

在三层嵌入方案中,若取 $R_1 = R_1^*$, $R_2 = R_2^*$,则以同样的最大平均失真 Δ 可达到嵌入率

$$H(R_1^*) + H \left(\frac{R_2^*}{1 - R_1^*} \right) + R_2^* \quad (15)$$

比较式 (14) 和 (15) 知,使用分布 $R_1 = R_1^*$, $R_2 = R_2^*$,三层嵌入与上界 (10) 的差距为

$$R_1^* \left[1 - H \left(\frac{R_2^*}{1 - R_1^*} \right) \right] \quad (16)$$

当 $1 - R_1^* = 2R_2^*$ 时,式 (16) 为零,即三层嵌入达到上界。由条件 $1 - R_1^* = 2R_2^*$,可解出式 (11) 中的对应的 α 和分布 $\{R_i^*\}$,进而得到此时的最大平均失真 $\Delta \approx 1.54$ 嵌入率 $R \approx 2.27$ 这是三层嵌入适用的最大嵌入率。

但是,注意 $R_1 = R_1^*$, $R_2 = R_2^*$ 并不总是 (9) 的最优分布,所以三层嵌入 (9) 与上界 (10) 的实际差距可能小于 (16)。本文计算了 (9) 的数值最优解。由图 2 可看出使用最优分布的三层嵌入 (9) 比使用分布 $R_1 = R_1^*$, $R_2 = R_2^*$ 时的 (15) 性能要稍好一些。

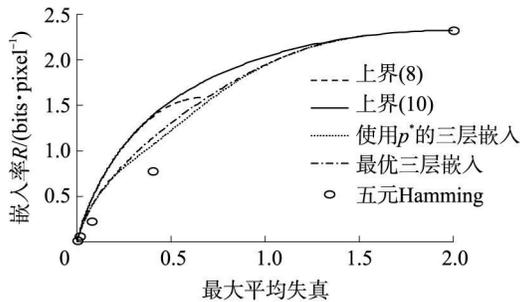


图 2 三层嵌入的性能

另外,由图 2 知,嵌入率比较小时, $f=1$ 与 $f=2$ 的上界基本重合,而此时三层嵌入与上界距离较大。注意到双层嵌入可接近 $f=1$ 的上界,所以对于 $f=2$ 采用如下嵌入策略:当需要的嵌入率 $0 < R \leq 1.5$ 时,使用双层嵌入;当 $1.5 \leq R \leq 2.27$ 时,使用三层嵌入,从而可在大部分嵌入率区域得到接近上界的嵌入方法。 $f=2$ 时,还可以采用五元编码,本文针对五元 Hamming 码作了比较。图 2 表明,双层嵌入与三层嵌入结合的嵌入策略明显优于五元 Hamming 码。

4 结束语

分别针对灰度值最大修改幅度不超过 1 和 2

的情况,研究了灰度级信号的数据嵌入问题,提出了双层嵌入方案和三层嵌入方案。通过结合湿纸码,本文的方法扩展了二元隐写码的应用范围,并显著提高了其嵌入性能,分析表明该方法可以接近理论上限。本文方法可以用来设计安全的数据隐藏算法。

参考文献:

- [1] Crandall R. Some notes on steganography [EB/OL]. <http://os.inf.udresden.de/~westfeld/crandall/Pdf/2007-01-15>
- [2] Westfeld A. F5-A steganographic algorithm: high capacity despite better steganalysis [A]. Proc of Information Hiding—the 4th International Workshop [C]. Berlin: Springer-Verlag, 2001: 289–302
- [3] Galand F, Kabaňiansky G. Information hiding by coverings [A]. Proc of the IEEE Information Theory Workshop [C]. America: IEEE, 2004: 151–154
- [4] Bierbrauer J, Fridrich J. Constructing good covering codes for applications in steganography [EB/OL]. <http://www.wsbinghamton.edu/fridrich/Research/stegocovsurveyOct07>. Pdf/2007-04-03
- [5] Schöfeld D, Winkler A. Embedding with syndrome coding based on BCH codes [A]. Proc of ACM the 8th Workshop on Multimedia and Security [C]. New York: Association for Computing Machinery, 2006: 214–223
- [6] Fridrich J, Soukal D. Matrix embedding for large payloads [J]. IEEE Transactions on Information Security and Forensics, 2006, 1(3): 390–394
- [7] Fridrich J, Filler T. Practical methods for minimizing embedding impact in steganography [EB/OL]. <http://www.wsbinghamton.edu/fridrich/Research/mar03>. Pdf/2007-04-03
- [8] Wilkins F, Dik M. Capacity and codes for embedding information in gray-scale signals [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2005, 51(3): 1209–1214
- [9] Zhang X, Wang S. Efficient steganographic embedding by exploiting modification direction [J]. IEEE Communications Letters, 2006, 10(11): 781–783
- [10] Fridrich J, Lisonek P. Grid coding in steganography [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2007, 53(4): 1547–1549
- [11] Fridrich J, Goljan M, Lisonek P, et al. Writing on wet paper [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2005, 53(10): 3923–3935