

简洁的 JPEG 图像隐写 DCT 系数选择方案 and 安全性增强策略

王康, 刘琲贝, 刘烁炜, 胡永健

(华南理工大学电子与信息学院, 广东 广州 510641)

摘要: 根据图像 JPEG 压缩的特点, 提出了一种简洁有效的 DCT 系数选择方案, 不仅充分利用了非零交流 DCT 系数, 而且还用到部分零值 DCT 系数; 此外, 通过改变系数的嵌入顺序, 优先考虑低频系数, 改善了算法的安全性。实验表明, 将 2 种典型的空域隐写算法 (EPES 和 APPM) 应用到所提出的算法框架, 获得了比 3 种经典压缩域隐写算法 (JSteg、F5 和 nsF5) 和新近提出的基于 STC 框架的 DCT 域隐写算法 (LPD) 更大的嵌入容量及更好的安全性。所提出的 DCT 系数选择和嵌入框架可有效提升嵌入容量和抗隐写分析的性能, 且所提方案具有通用性, 可应用于不同隐写算法。

关键词: 图像信息隐藏; JPEG; 低频优先; 嵌入容量; 安全性

中图分类号: TP309.7

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-109x.2016.00094

Succinct scheme of DCT coefficient selection towards enhanced security of JPEG image steganography

WANG Kang, LIU Bei-bei, LIU Shuo-wei, HU Yong-jian

(School of Electronic and Information Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: Based on the characteristics of JPEG compression, a succinct and effective scheme of DCT coefficients selection was proposed, in which not only the non-zero AC coefficients but also part of the zero coefficients were exploited. Moreover, the scheme embedded messages in a different order than the conventional practice and gave priority to the low frequency coefficients so as to achieve enhanced security. The embedding manners of two typical steganographic algorithms (EPES and APPM) were extended from the spatial to the compression domain and the proposed scheme was applied to them for coefficient selection and embedding. Experimental results showed that larger capacity and better security were achieved compare to three classical steganographic algorithms (JSteg, F5 and nsF5) and one current steganographic algorithm based on STC framework (LPD). The proposed coefficient selection and embedding scheme can effectively improved the performance of some classic DCT domain steganographic methods in terms of capacity and security. The scheme was general and could be easily applied to different steganography methods.

Key words: image data hiding, JPEG, low frequency priority, embedding capacity, security

收稿日期: 2016-07-08; 修回日期: 2016-09-02。通信作者: 刘琲贝, eebbliu@scut.edu.cn

基金项目: 广东省应用型科技研发专项基金资助项目 (No.2015B010130003); 广州市科技基金资助项目 (No.201510010275); 广州市人体数据科学重点实验室基金资助项目 (No.201605030011)

Foundation Items: The Research and Development Fund for Applied Science of Guangdong Province (No.2015B010130003), The Science and Technology Program of Guangzhou (No.201510010275), Guangzhou Key Laboratory of Human Data Science (No.201605030011)

1 引言

JPEG 图像是目前使用最广泛的图像格式,也是隐写术最实用的载体之一。例如,经典的 JPEG 域隐写算法 JSteg 直接将非零 DCT 系数的最低位替换为密信序列。虽然这种算法嵌入方式简单,但含密图像的 DCT 系数存在值对现象,容易被隐写分析算法检测出来,安全性较低。F5 算法^[1]是一种基于汉明码的矩阵编码算法,通过减小 DCT 系数的绝对值来嵌入密信,同时引入矩阵编码和随机置乱的思想,将密信均匀嵌入到不同的单元中,提高了算法的安全性。不过 F5 算法在嵌入密信的过程中会减少 DCT 系数的绝对值,使 DCT 系数的分布整体下沉,0 值 DCT 系数大量增加,给算法的安全性带来了一定的影响,同时该算法还存在无效收缩(shrinkage)的现象,降低了算法的性能。Fridrich^[2]在 F5 算法和湿纸编码的基础上提出了 nsF5 (no shrinkage F5) 算法,利用湿纸编码算法通信信道不对等的特性消除了 F5 算法存在的无效收缩现象,获得了更好的嵌入安全性。Filler 等在文献[3]中提出了一种伴随式网格编码算法(STC, syndrome trellis coding),可在编码的过程中结合损失函数来嵌入密信,在最小化整体嵌入损失的前提下获得接近理论上限的嵌入效率。目前已有不少基于 STC 框架的 DCT 域隐写算法,如文献[4]提出一种基于优化模型(MOD, model optimized distortion)的嵌入损失设置方式;文献[5]利用 DCT 分块内相邻系数和相邻块间同位置系数来对系数值进行线性预测,并将预测误差作为嵌入失真的依据,预测误差越大的系数,嵌入损失越小(LPD, linear prediction distortion),获得比 MOD 算法更好的安全性。Holub 等在文献[6]中提出 UNIWARD (universal wavelet relative distortion) 算法,利用载体图像的小波系数来设置嵌入损失。文献[7,8]提出为了使隐写前后 DCT 系数的统计特征变化最小,应在均匀选择不同幅值的系数进行嵌入。此外,文献[9]借助未压缩图像的辅助信息来设计隐写损失函数。

虽然基于 STC 编码框架的 DCT 域隐写算法

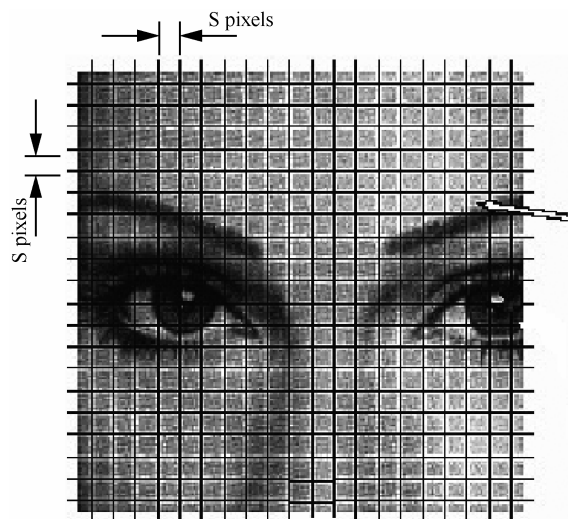
获得了较好的嵌入效果,但是这种框架下的算法一般具有较高的运算复杂度。本文提出了一种新的简洁有效的 DCT 系数选择方案,在保证图像质量的前提下,不仅充分利用了非零交流 DCT 系数,而且还用到部分 0 值 DCT 系数,因此具有更多的嵌入位置;此外,为提高算法的安全性,通过修改密信嵌入顺序,采用低频优先的嵌入策略,改善算法的安全性。为了验证本文系数选择和嵌入顺序方案的普适性,本文将 2 种流行的空域隐写方案(EPEs^[10]和 APPM^[11])应用于所提出的算法框架,获得了比 JSteg、F5、nsF5 以及 LPD 更大的隐写容量和更好的安全性,与以 UNIWARD 为代表的基于 STC 编码框架的隐写算法相比则有更低的复杂度。

2 方案 1: 新的 DCT 系数选择方案

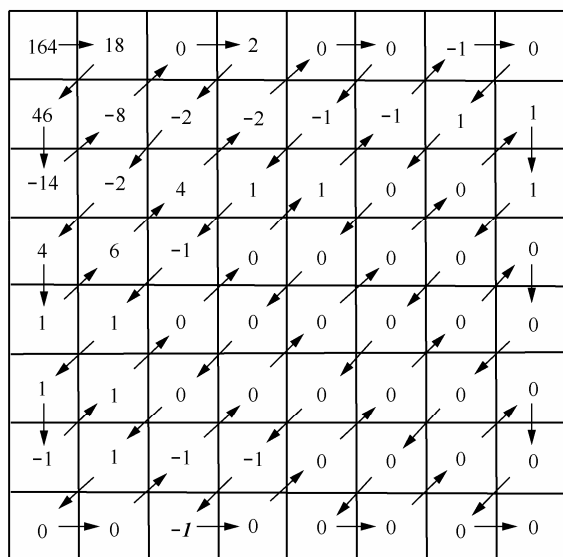
传统的 DCT 域隐写算法,如 JSteg、F5 等,仅在非零交流 DCT 系数上嵌入密信(以下简称传统系数选择方案)。由于自然图像经过 JPEG 压缩后大部分交流 DCT 系数值为 0,往往会导致传统系数选择方案下的隐写算法容量相对较小。此外,为保证正确抽取密信,不少 DCT 域隐写算法也会损失一部分可用 DCT 系数,如 F5 算法的收缩现象和 JSteg 算法不在值为 1 的 DCT 系数上嵌入密信,这些做法进一步降低了隐写算法的容量。

考虑到 JPEG 压缩对交流 DCT 系数采用的是行程长度编码,DCT 子块会有很多连续的零值,修改零值交流 DCT 系数会对 JPEG 压缩算法的压缩效率造成一定的影响。但分析图 1 发现,量化后的 DCT 系数块中较长的连续 0 值一般只分布在高频部分,JPEG 行程长度编码主要对这部分系数有较好的压缩效果,而低频部分的零值 DCT 系数一般比较分散,因此修改低频部分的零值系数对 JPEG 压缩的影响较小。

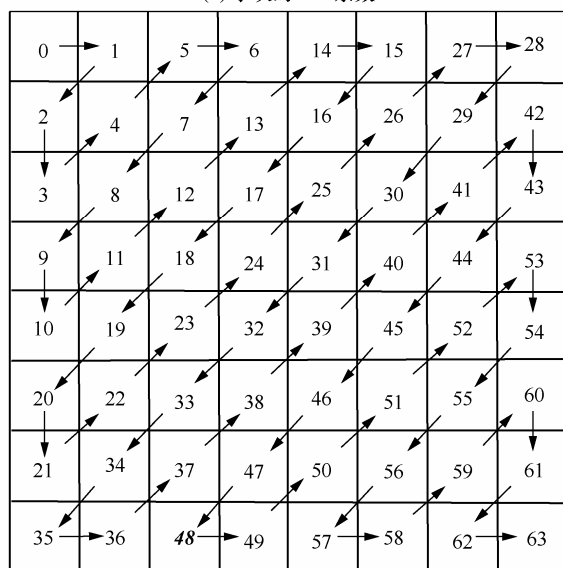
据此,本文提出一种新的 DCT 系数选择方案(以下简称方案 1),通过对载体图像进行预扫描来获取载体图像所有可嵌的 DCT 系数。为了将现有的典型空域隐写算法直接扩展到 DCT 域上,提出分别利用正负 DCT 系数的原码和补码来嵌入密信。方案 1 具体描述如下。



(a) 原始图像



(b) 子块的DCT系数



(c) DCT系数在zigzag扫描顺序下的对应下标

图1 图像某个 8×8 子块的DCT系数

1) 对载体图像第 i 个 8×8 子块的 DCT 系数, 按 zigzag 扫描找到最后一个非零交流 DCT 系数 B_i (如图 1(b)所示, B_i 为第 8 行第 3 列斜体的 -1)。

2) 根据图 1(c)中 DCT 系数在 zigzag 扫描顺序下的对应下标, 记录 B_i 对应的下标 d_i (如图 1(b)中的 B_i 对应的下标 d_i 为 48), 并将子块中下标小于 d_i 的交流 DCT 系数抽取出来, 作为该子块的可嵌 DCT 系数。

3) 对每个子块重复步骤 1)和步骤 2), 得到载体图像所有的可嵌 DCT 系数。

4) 利用选定的隐写算法, 将密信嵌入到可嵌 DCT 系数的原码和补码上。

值得注意的是, 在步骤 2)中, 为了保证接收方提取密信的系数位置和发送方嵌入密信的系数位置一致, 在嵌密时不修改最后一个非零 DCT 系数 B_i 的值, 以确保 B_i 的位置在嵌入密信和提取密信时保持一致, 即总是抽取子块中下标小于 d_i 的交流 DCT 系数来嵌入和提取密信。

与传统系数选择方案相比, 方案 1 除了有更多的可嵌 DCT 系数外, 还不会出现无效嵌入的情况, 以 JSteg 算法为例, 方案 1 利用了 JSteg 抛弃 1 以及部分的 0 值交流系数。

3 方案 2: 低频优先的 DCT 系数嵌入方案

为提高算法的安全性, 本文提出改变密信嵌入的顺序, 即选择同一频率下的交流系数进行嵌入, 且从最低频率位置开始 (以下简称为方案 2)。具体方案如下。

1) 对图像每个 8×8 子块的交流 DCT 系数按照 zigzag 扫描的顺序从低频到高频分配 63 个不同的嵌入优先级 P ($P=1, 2, \dots, 63$), 如图 2(a)所示, P 越小优先级越高。

2) 取出所有子块中优先级 $P=1$ 的非零 DCT 系数。

3) 继续依次取出优先级 $P=2, \dots, 63$ 的所有子块的非零 DCT 系数, 得到图像最终的待嵌系数序列。

4) 利用选定的隐写算法, 将密信嵌入到待嵌 DCT 系数的原码和补码上。

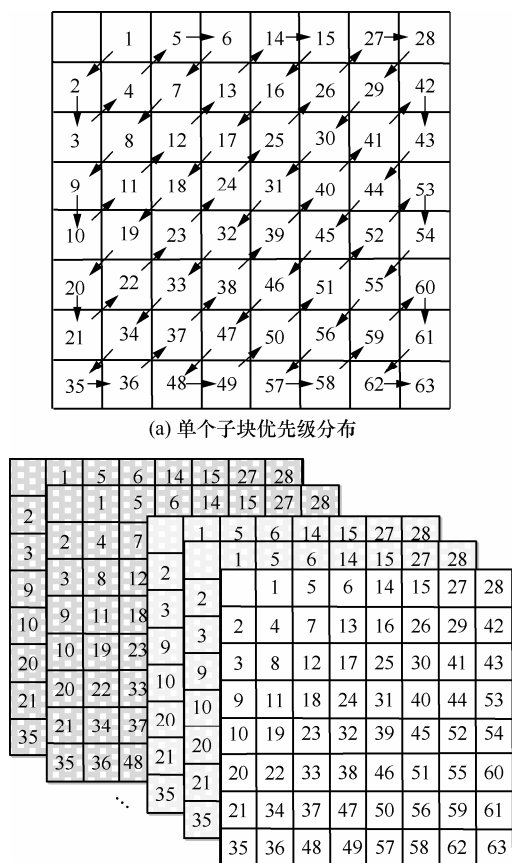


图2 DCT系数优先级分布图(低频优先)

4 方案1和方案2的融合

根据第2节和第3节的分析,将方案1和方案2进行融合,得到完整的DCT系数选择和嵌入框架。

4.1 嵌入密信过程

嵌入密信过程如下:

- 1) 读取载体图像量化后的DCT系数;
- 2) 根据密钥 k 以 8×8 子块为单位进行混洗,块内系数不混洗;
- 3) 找到每个 8×8 子块在zigzag扫描顺序下的最后一个非零DCT系数 B_i 和下标 d_i ;
- 4) 依次取出优先级 P ($P=1,2,\dots,63$)的所有子块的可用系数(若子块 i 最后一个非零交流系数 B_i 在zigzag扫描顺序下的对应下标 d_i 有 $d_i > P$,则该子块中优先级为 P 的系数可用,否则系数不可用),得到待嵌序列 S ;
- 5) 利用选定的嵌入算法在待嵌序列 S 的原码和补码上嵌入密信 M ,得到含密序列 S' ;

6) 利用含密序列 S' 恢复DCT系数矩阵,得到含密图像。

4.2 提取密信过程

提取密信过程如下:

- 1) 读取含密图像量化后的DCT系数;
- 2) 根据密钥 k 以 8×8 子块为单位进行混洗,块内系数不混洗;
- 3) 找到每个 8×8 子块在zigzag扫描顺序下的 B_i 和 d_i ;
- 4) 依次取出优先级 P ($P=1,2,\dots,63$)的所有子块的可用系数(和嵌入过程相同),得到含密序列 S' ;
- 5) 利用提取算法在含密序列 S' 的原码和补码上提取密信 M 。

5 实验结果与分析

5.1 2种典型空域隐写算法介绍

为了证明本文系数选择和嵌入顺序方案的普适性,选择2种流行的空域隐写方案EPES (efficient high payload ± 1 data embedding scheme)^[10]和APPM(adaptive pixel pair matching)^[11]进行实验。下面首先简单回顾这2种算法。

1) EPES 算法

EPES算法是Omoomi等^[10]于2011年提出的一种LSBMR改进算法,原文直接用于空域图像。在DCT域上使用时,可以利用长度为 l 的DCT系数的最低位和次低位之间的关系来嵌入密信,其中负DCT系数通过补码来找最低位和次低位,主要过程如下。

负整数的补码和正整数原码类似,负奇整数补码的最低有效位为1,负偶整数补码的最低有效位为0,假设 $b_i(x)$ 表示 x (x 为正DCT系数的原码或负DCT系数的补码)的第 $i+1$ 个比特,则 $b_i(x)$ 有以下3个性质。

性质1 $b_0(x \pm 1) = \overline{b_0(x)}$; $x \pm 1$ 必然导致 x 的最低位翻转。

性质2 $b_1(x) = b_1(x-1) = \overline{b_1(x+1)}$, x 是奇数, $b_1(x) = b_1(x+1) = \overline{b_1(x-1)}$, x 是偶数;奇系数减1或者偶系数加1不改变 x 的次低位,奇系数加一或者偶系数减一使 x 的次低位翻转。

为了能够利用 l 个交流DCT系数之间的关系

来嵌入 l 位密信, 和文献[7]类似, 定义一个描述系数次低 LSB 位和最低 LSB 位关系的二值函数 $B(u, v)$ 。

$$B(u, v) = b_1(u) \oplus b_0(v) \quad \forall u, v \in Z \quad (1)$$

由性质 1 和性质 2, 可以推出 $B(u, v)$ 函数具有如下 2 个性质。

$$\text{性质 3} \quad B(u, v) = \begin{cases} B(u+1, v), & u \text{ 是偶数} \\ B(u-1, v), & u \text{ 是奇数} \end{cases}, \quad \forall u, v \in Z。$$

$$\text{性质 4} \quad B(u, v) = B[u + (-1)^u, v] = \bar{B}[u - (-1)^u, v], \quad \forall u, v \in Z。$$

记 $(x_1, x_2, \dots, x_l)$ 和 $(y_1, y_2, \dots, y_l)$ 分别为载体图像 DCT 系数值和含密图像 DCT 系数值, $(m_1, m_2, \dots, m_l)$ 为待嵌密信比特。

嵌入密信: 将 $(x_1, x_2, \dots, x_l)$ 修改为 $(y_1, y_2, \dots, y_l)$ 使式(2)成立。

$$\begin{cases} m_i = B(y_i, y_{i+1}), & i \in 1, \dots, l \\ y_{i+1} = y_i \end{cases} \quad (2)$$

提取密信: 利用式(2), 从 $(y_1, y_2, \dots, y_l)$ 中提取密信 $(m_1, m_2, \dots, m_l)$ 。

2) APPM 算法

APPM 算法是 Hong 等^[11]于 2012 年提出的一种像素对自适应匹配嵌入方法, 可以嵌入任意进制表示的密信, 具有较高的嵌入效率和嵌入容量, 其嵌入算法对 DCT 系数同样适用, 主要过程如下。

首先对于给定的进制 B 和已知预嵌密的系数对 (x, y) , 定义特征函数 $f(x, y) = (x + C_B y) \bmod B$, 采用最小均方差的标准, 利用最优化问题获得最优的 C_B 和 $\Phi_B(x, y)$ (用 $\Phi_B(x, y)$ 表示 B 个系数对 (x_i, y_i) , 即代表 (x, y) 的邻域集)

$$\begin{aligned} & \text{Minimize: } \sum_{i=0}^{B-1} ((x_i - x)^2 + (y_i - y)^2) \\ & \text{Subject to: } \begin{cases} f(x_i, y_i) \in \{0, 1, \dots, B-1\} \\ f(x_i, y_i) \neq f(x_j, y_j), \text{ 如果 } i \neq j, \\ \text{那么 } 0 \leq i, j \leq B-1 \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

嵌入密信: 通过特征函数 $f(x, y)$ 计算菱形特征值 (DCV, diamond characteristic values), 搜索 $\Phi_B(x, y)$ 邻域里的每一个 DCV 值, 当满足 $f(x', y') = s_B$ 时, $\Phi_B(x, y)$ 邻域中的坐标 (x', y') 将代替 (x, y) , 从而完成一个 B 进制密信的嵌入。

提取密信: 采用嵌入过程同样的顺序, 对各

个系数值扫描。系数值对 (x', y') 的 DCV 值便是需要提取出来的密信。

5.2 方案 1 的实验

为了验证方案 1 的合理性, 分别利用传统系数选择方案和方案 1 来选择待嵌系数, 然后进行密信嵌入, 分析嵌密图像的差异。

1) 对嵌入容量的提升

在 NRCS 图像库^[12]中随机选取 100 幅 TIF 格式的图像, 将其压缩成 JPEG 图像 (质量因子 $Q=80$), 分别计算所有图像在传统系数选择方案和方案 1 下可修改 DCT 系数的个数。然后以 5.1 节中的 EPES 算法为例, 分别计算 2 种方案下算法的嵌入容量。

由图 3 可知, 与传统系数选择方案相比, 本文提出的方案 1 可修改的 DCT 系数个数大大增加, 隐写容量也相应地大幅度提高。同时, 在传统系数选择方案下, 当 EPES 算法将绝对值为 1 的交流系数修改为 0 时会出现无效嵌入, 这时必须对密信进行重复嵌入, 造成了系数值的浪费, 降低了算法的容量; 而在方案 1 下不会出现这样的现象。

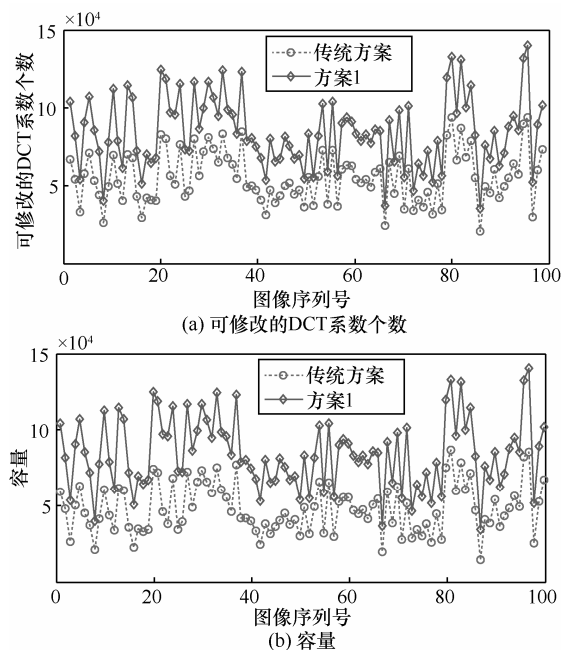


图 3 2 种系数选择方案下可修改 DCT 系数、隐写容量比较

2) 对安全性的增强

对 NRCS 图像库中 1 574 幅大小为 512×512 的 TIF 图像, 将其压缩成 JPEG 图像 (质量因子 $Q=80$), 在 2 种系数选择方案下, 利用 EPES 算

法以 0.1 bpnz、0.2 bpnz 嵌入率嵌入密信, 然后利用 Chen486^[13]特征进行攻击, 检测的 ROC 曲线如图 4 所示。由图 4 可知, 方案 1 具有更好的隐写安全性, 这主要是因为方案 1 不会出现无效嵌入, 故在相同的嵌入率下修改的系数个数要少。

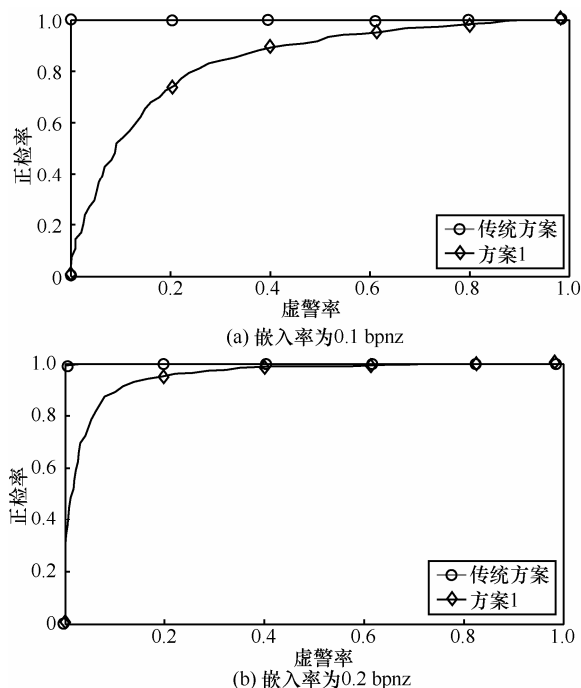


图4 传统系数选择方案和方案1的安全性对比

5.3 方案2对算法安全性的提升

同样选取 NRCS 图像库中的 1 574 幅图像作为隐写载体, 在 0.1 bpnz 和 0.2 bpnz 嵌入率下分别采用传统系数选择方案和方案 2 来选择待嵌序列, 并同样以 EPES 算法为例来嵌入密信, 然后利用 chen486 算法对含密图像进行分析, 结果如图 5 所示。由图 5 可知, 方案 2 修改嵌入顺序的做法确实提高了算法的安全性。

5.4 与代表性算法的比较

将 5.1 节中 2 种现有的典型空域隐写算法 (EPES 算法和 APPM 算法) 直接应用于 4.1 节所描述的算法框架, 与 JSteg、F5、nsF5 及 LPD 这 4 种 DCT 域隐写算法进行比较, 考察其一般性能。此时, EPES 的参量 $l=4$, APPM 采用 5 进制。

1) 算法容量的比较

实验随机选取 NRCS 图像库中 50 幅尺寸为 512×512 、存储为 TIF 格式的灰度图像, 取质量因子为 80, 分别计算 JSteg、F5、nsF5、LPD、本

文框架下 EPES (以下称 Adopted-EPES) 和 APPM (以下称 Adopted-APPM) 算法的嵌入容量。

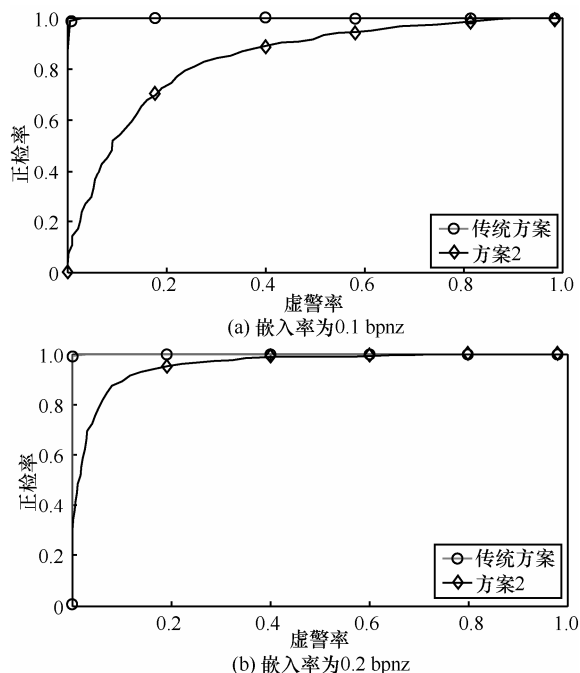


图5 传统系数选择方案和方案2的安全性对比

由于 JSteg 算法仅在值不为 1 的非零交流 DCT 系数上嵌入密信, F5 算法在满嵌时退化为 F4 算法, 在绝对值为 1 的交流系数上嵌入密信时会有 50% 的概率出现收缩现象, 如图 6 所示, 这 2 种算法的容量大致相等且均相对较低。nsF5 算法和 LPD 算法类似, 在所有非零交流 DCT 系数上嵌入密信, 且不存在收缩现象, 因而算法的容量比 JSteg 和 F5 大。而 Adopted-EPES 算法和 Adopted-APPM 算法均有更大的嵌入容量。Adopted-APPM 算法的嵌入容量要大于 Adopted-EPES 算法, 这主要和 APPM 算法的特点相关。

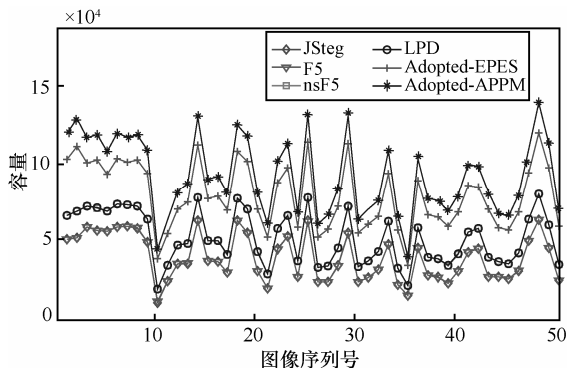


图6 6种DCT域隐写算法的容量比较

2) 抗隐写分析攻击能力评估

安全性是评估隐写算法性能的重要指标之一。选用 Chen486 (486 维) 和 CF (7 850 维)^[14] 这 2 种常用的 DCT 域通用隐写分析算法来评估隐写算法的安全性。隐写分析算法 Chen486 通过计算 DCT 系数块内和块间的转移概率矩阵来提取特征, 是一种针对 JPEG 图像强有力的通用型隐写分析算法。CF7850 是 Kodovsky 等^[14] 提出的一种较高维度 DCT 域通用隐写分析算法, 对含密图像有着更好的检测效果。实验在 NRCS 图像库中进行, 包含 1 574 幅大小为 512×512 的 TIF 格式的灰度图像, JPEG 压缩的质量因子设置为 80。

图 7 显示了 Chen486 对 6 种隐写算法 (JSteg、F5、nsF5、LPD、Adopted-EPES 和 Adopted-APPM 算法) 检测的 ROC 曲线。在图 7(b)~图 7(d) 中, 本文 Adopted-EPES 和 Adopted-APPM 算法 ROC 曲线都偏向于右下, 即使在嵌入率为 0.1 bpnz 的图 7(a) 中也只有 LPD 算法的 ROC 曲线与本文 2 种算法基本重合, 其他算法的 ROC 曲线均偏于左上, 说明在本文隐写算法框架下, 2 种算法抗隐写分析攻击能力优于其他 4 种算法。尤其在嵌入率为 0.1 bpnz 和 0.2 bpnz 时, Chen486 的检测曲线差不

多是 45° 的斜线, 说明检测几乎失效。至于 Adopted-EPES 和 Adopted-APPM 本身, 两者在嵌入率为 0.1 bpnz 和 0.2 bpnz 时抗攻击性能相当; 而在嵌入率为 0.4 bpnz 和 0.8 bpnz 时, Adopted-APPM 性能要优于 Adopted-EPES, 这主要和 APPM 及 EPES 本身的工作原理有关。

图 8 显示了 CF7850 对 5 种隐写算法检测的 ROC 曲线。无论是图 8(a) 还是图 8(b), 本文框架下的 2 个算法的 ROC 曲线都偏向于右下, 依然说明本文隐写算法框架下的 2 个算法其抗隐写分析攻击能力优于其他 3 种算法。此外, 由图 7(b) 和图 8(b) 对比可知, CF7850 比 Chen486 具有更优的检测性能。

本文也和基于 STC 编码框架的 UNIWARD 隐写算法进行了比较。表 1 显示 UNIWARD 算法的安全性很高, 在 5 种嵌入率下基本上都优于本文的 Adopted-EPES 和 Adopted-APPM 算法。然而, 本文方法与 UNIWARD 相比主要优势在于计算复杂度大大降低。在硬件配置为 RAM 8 GB、主频为 3.3 GHz、软件平台为 Matlab 2015b 时, 在大小为 512×512 的载体图像上以 0.4 bpnz 的嵌入率嵌入密信, UNIWARD 算法平均每幅图像需要 4.86 s, 而本文算法仅需要约 0.11 s。

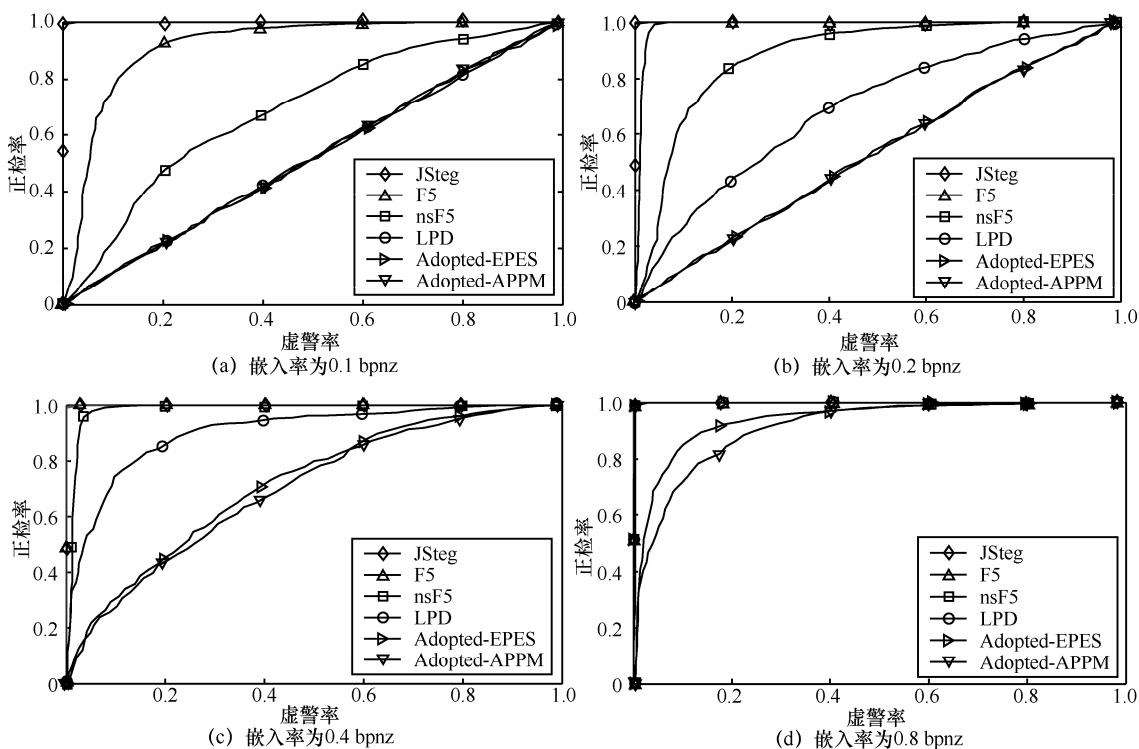


图 7 不同嵌入率下 Chen486 算法检测的 ROC 曲线

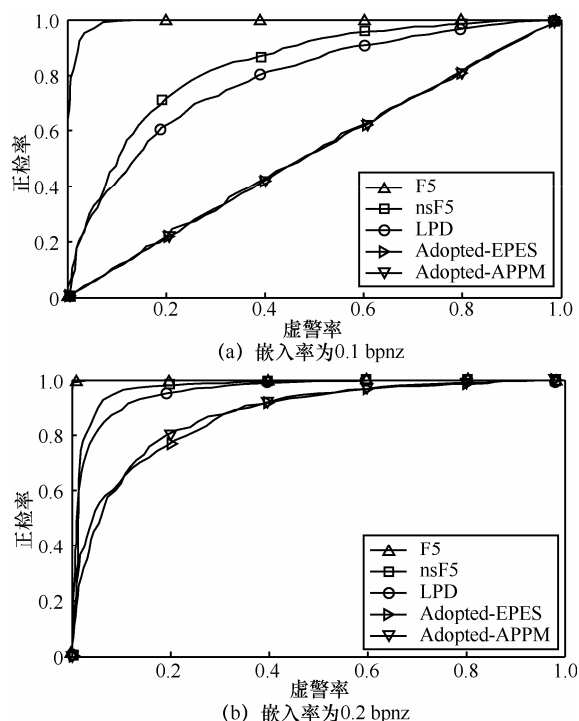


图8 不同嵌入率下 CF7850 算法检测的 ROC 曲线

表1 UNIWARD、Adopted-EPES 和 Adopted-APPM 算法在 chen486 攻击下的正检率

嵌入率/bpnz	正检率		
	UNIWARD	Adopted-EPES	Adopted-APPM
0.1	47.8%	48.1%	47.6%
0.2	48.0%	48.4%	48.5%
0.4	47.2%	51.5%	52.6%
0.6	47.7%	68.7%	62.9%
0.8	53.3%	89.3%	80.6%

6 结束语

针对目前 DCT 域隐写算法在容量和安全性方面的局限,提出了一种扩容和增强安全性的 DCT 系数选择框架。为了验证这个框架的有效性,将2种现有的空域算法(EPES 和 APPM)应用到这个框架。实验证明,可获得比其他经典隐写算法更大的嵌入容量和更好的安全性,且与最新的基于 STC 编码框架的隐写算法相比仅需极小的运算量。本文的2个隐写范例也表明,所提出的框架具有广泛的适用性,可以较容易地把针对空域像素嵌入的方案直接推广到这个框架。

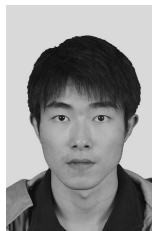
参考文献:

[1] WESTFELD A. F5-A steganographic algorithm high capacity despite better steganalysis[C]//The 4th Information Hiding Interna-

tional Workshop. 2001: 289-302.

- [2] FRIDRICH J, PEVN T, KODOVSKY J. Statistically undetectable jpeg steganography: dead ends challenges, and opportunities[C]//The Workshop on Multimedia & Security. 2007:3-14.
- [3] FILLER T, JUDAS J, FRIDRICH J. Minimizing additive distortion in steganography using syndrome-trellis codes[J]. IEEE Transactions on Information Forensics & Security, 2011, 6(3):920-935.
- [4] FILLER T, FRIDRICH J. Design of adaptive steganographic schemes for digital images[C]//SPIE Electronic Imaging, Media Watermarking, Security, and Forensics XIII 2011: 1-14.
- [5] WANG C, NI J, WANG C. New distortion metric for efficient JPEG steganography using linear prediction[J]. Journal of Signal Processing Systems, 2015, 81(3): 389-400.
- [6] HOLUB V, FRIDRICH J, DENEMARK T. Universal distortion function for steganography in an arbitrary domain[J]. Eurasip Journal on Information Security, 2014(1):1-13.
- [7] GUO L, NI J, SHI Y. Uniform embedding for efficient JPEG steganography[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2014: 814-825.
- [8] GUO L. Using statistical image model for JPEG steganography: uniform embedding revisited[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2015, 10(12): 1.
- [9] HUANG F, et al. Distortion function designing for JPEG steganography with uncompressed side-image[C]//The first ACM Workshop on Information Hiding and Multimedia Security. 2013.
- [10] OMOOMI M, SAMAVI S, DUMITRESCU S. An efficient high payload ± 1 data embedding scheme [J]. Multimedia Tools and Applications, 2011, 54(2): 201-218.
- [11] HONG W, CHEN T. A Novel data embedding method using adaptive pixel pair matching[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2012, 7(1):176-184
- [12] United States Department of Agriculture. Natural resources conservation service photo gallery[EB/OL]. <http://photogallery.nrcs.usda.gov>.
- [13] CHEN C, SHI Y. JPEG image steganalysis utilizing both intrablock and interblock correlations[C]//IEEE International Symposium on Circuits and Systems. 2008: 3029-3032.
- [14] KODOVSKY J, FRIDRICH J, HOLUB V. Ensemble classifiers for steganalysis of digital media[J]. IEEE Transactions on Information Forensics & Security, 2012, 7(2):432-444.

作者简介:



王康(1992-),男,湖南常德人,华南理工大学硕士生,主要研究方向为多媒体信息隐藏。

刘琲贝(1980-),女,广东广州人,博士,华南理工大学讲师,主要研究方向为多媒体信息隐藏、多媒体信息取证。

刘炼炜(1991-),男,湖南郴州人,华南理工大学博士生,主要研究方向为多媒体信息隐藏。

胡永健(1962-),男,湖北武汉人,博士,华南理工大学教授,主要研究方向为多媒体信息隐藏、多媒体信息取证、图像处理、模式识别。