

# 离散余弦变换域隐藏算法隐藏容量与频域系数选择研究

谢建全<sup>1,2</sup>, 谢 勍<sup>1</sup>, 田立军<sup>1</sup>

(1. 湖南财政经济学院 信息管理系, 长沙 410205; 2. 中南大学 信息科学与工程学院, 长沙 410083)

(xiejianquan@sina.com)

**摘 要:** 隐藏容量、不可感知性和鲁棒性是信息隐藏系统的几个关键性指标, 选择不同的离散余弦变换(DCT)系数对DCT域隐藏算法的这些指标影响很大。分析了不同DCT系数的视觉感知特性和DCT逆变换的相互干扰性对嵌入容量的影响, 并给出了DCT域隐藏算法隐藏容量与所选择的系数之间的关系, 通过分析JPEG压缩不变性给出了嵌入信息抗压缩的鲁棒性与嵌入位置无关的结论, 可为提高嵌入容量提供参考。仿真实验结果有效地支持了理论分析所得出的结论, 实验还证明在有噪声干扰下这一结论仍然成立。

**关键词:** 信息隐藏; 嵌入容量; 频域系数; 压缩不变性; 离散余弦变换; 逆变换

**中图分类号:** TP309.2 **文献标志码:** A

## Choice of hiding capacity and frequency coefficients in DCT domain hiding algorithm

XIE Jian-quan<sup>1,2</sup>, XIE Qing<sup>1</sup>, TIAN Li-jun<sup>1</sup>

(1. Department of Information Management, Hunan University of Finance and Economics, Changsha Hunan 410205, China;

2. School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha Hunan 410083, China)

**Abstract:** Hiding capacity, robustness and invisibility are some of the key parameters in information hiding system. Moreover, these parameters are seriously impacted by the difference of Discrete Cosine Transform (DCT) coefficients in DCT domain hiding algorithm. Embedded capacity, which is impacted by the mutual interference of visual perception of different DCT coefficients and the reverse DCT, was analyzed in this paper. Furthermore, the relation between hiding capacity and coefficients-chosen was given out in DCT domain hiding algorithm. A conclusion that there is no correlation between embedded position and robustness against compression of embedded information was put forward, and embedded capacity could be improved in reference to this conclusion. The experimental results show that this conclusion is correct even if the system is disturbed by noise.

**Key words:** information hiding; embedded capacity; frequency coefficient; compression invariance; Discrete Cosine Transform (DCT); inverse transformation

## 0 引言

信息隐藏是将需要传递的重要信息嵌入到可以公开的其他载体中,但同时又能保持这些载体的外部特征及使用价值基本不变,从而实现重要信息的隐秘传递。它作为一种保证信息安全传递的重要手段,可以有效地应用在数字水印和秘密通信等领域,引起了人们的极大关注。目前用来作为信息隐藏的载体有文字、图像、语音或视频等多种不同格式的文件,在使用方法上没有本质的区别,都是利用人类视觉或听觉的感知局限性来隐藏信息。其中图像由于冗余空间大,是目前用得最多的信息隐藏载体。基于图像的信息隐藏技术可以分为两种:基于变换域的隐藏技术和基于空间域的隐藏技术。一般意义上,空间域方法算法简便,信息隐藏量大,信息嵌入和提取速度快。但这种隐藏算法对多数攻击的鲁棒性不强,而且许多空间域隐藏算法也容易被检测到<sup>[1]</sup>,安全性不高,使其应用受到很大限制。为提高隐藏信息的鲁棒性,不少学者提出了多种变换域方法,比如离散余弦变换(Discrete Cosine Transform, DCT)域算法、离散小波变换(Discrete

Wavelet Transform, DWT)域算法、离散傅里叶变换(Discrete Fourier Transform, DFT)域算法、哈德码变换(Hadamard Transform, HT)域算法、奇异值分解(Singular Value Decomposition, SVD)变换域<sup>[2]</sup>、Contourlet变换域<sup>[3-4]</sup>、Fourier-Mellin算法和脊波变换域算法等多种,其中DCT域算法由于与目前广泛使用压缩标准(JPEG、MPEG、H261/263)兼容,因此是应用最广的变换域算法。

目前的DCT域信息隐藏算法在DCT系数的选择上,学者们有不同的看法:Cox等人<sup>[5]</sup>提出将信息隐藏到除DC系数以外的1000个系数中,黄继武等人<sup>[6]</sup>提出将信息隐藏到直流分量中,为兼顾不可感知性和鲁棒性更多学者倾向于用中频系数来隐藏信息<sup>[7]</sup>。这些算法着重点都是水印的鲁棒性,而对嵌入容量则较少考虑,因而这些算法的嵌入容量都非常有限。然而隐藏容量是信息隐藏系统的关键性指标之一,在很多应用场合都要求信息隐藏系统有足够的嵌入容量,比如在秘密通信、篡改认证等场合如果嵌入容量过小,就基本没有应用价值,因此如何选择系数,使算法具有较大的嵌入容量的研究非常重要。本文通过理论分析和仿真实验结出了DCT类

收稿日期:2010-10-09;修回日期:2010-11-15。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60574030);湖南省科技计划项目(2009FJ3110)。

作者简介:谢建全(1964-),男,湖南双峰人,教授,博士,主要研究方向:信息安全; 谢勍(1966-),女,江苏江阴人,副教授,硕士,主要研究方向:数字水印; 田立军(1968-),男,湖南安化人,讲师,博士研究生,主要研究方向:网络安全。

算法嵌入容量与所选择的系数之间的关系,为提高嵌入容量提供参考。

## 1 DCT 变换特性与 DCT 载体系数的选择

### 1.1 DCT 系数的视觉感知特性对 DCT 载体系数选择的影响

不同 DCT 系数的视觉感知特性是不同的,式(1)是 Watson 模型定义的一个频率敏感度矩阵,它是一些参数的函数,包括图像的分辨率,以及观察者对图像的距离。矩阵中的每一个元素  $t(i, j)$  表示图像中每一个不相交  $8 \times 8$  像素块,在不考虑任何掩蔽噪声的情况下该系数可被感知的 DCT 系数的最小幅度(也就是产生一个单位 JND 的系数变化值),这个值越小说明人眼对该频率越敏感。从式(1)还可以看出,在相同的不可感知性指标的约束下,一个  $8 \times 8$  像素块的 DCT 系数中,随着频率的增高可允许修改的值可以更大些,或者在同样的修改幅度下可允许修改的值的个数可以更多,从而达到增加容量的目的。

$T =$

1.40	1.01	1.16	1.66	2.40	3.43	4.79	6.56
1.01	1.45	1.32	1.52	2.00	2.71	3.67	4.93
1.16	1.32	2.24	2.59	2.98	3.64	4.60	5.88
1.66	1.52	2.59	3.77	4.55	5.30	6.28	7.60
2.40	2.00	2.98	4.55	6.15	7.46	8.71	10.17
3.43	2.71	3.64	5.30	7.46	9.62	11.58	13.51
4.79	3.67	4.60	6.28	8.71	11.58	14.50	17.29
6.56	4.93	5.88	7.60	10.17	13.51	17.29	21.15

DCT 系数变化的可感知度还受  $8 \times 8$  像素块的平均亮度影响,平均亮度越高,DCT 系数就允许修改较大的数值而不被察觉。Watson 模型根据块的平均亮度来调整不同块的 DCT 系数敏感度,其计算公式如下:

$$t_L(i, j, k) = t(i, j) (C(0, 0, k) / C(0, 0, 0))^\alpha \quad (2)$$

式(2)中: $t_L(i, j, k)$  为根据块亮度调整后的掩蔽门限值; $t(i, j)$  为式(1)中各 DCT 系数的敏感度值; $C(0, 0, k)$  为第  $k$  个像素块的直流项(它代表该块的平均亮度); $C(0, 0)$  为整幅图像各子块的直流系数的平均值,也可以设定为代表图像预期强度的常数; $\alpha$  为一常数,通常取值为 0.649。从式(2)可以看出,在一幅图像中,比较明亮的区域可以在不被察觉的情况下进行较大改动。

### 1.2 逆变换的相互干扰性对 DCT 载体系数选择的影响

设载体图像为  $I = \{f(x, y), x, y = 0, 1, \dots, N-1\}$ , 待隐藏信息为  $W = \{w_j, j = 0, 1, \dots, L-1\}$ , 变换域图像为  $S = \{s(u, v), u, v = 0, 1, \dots, N-1\}$ , 隐藏信息后的图像为  $I^* = \{f^*(x, y), x, y = 0, 1, \dots, N-1\}$ , 信息隐藏的基本步骤为:

1) 对  $I$  做离散余弦变换:

$$s(u, v) = \frac{1}{N} a(u) a(v) \cdot$$

$$\sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \cos\left(\frac{\pi u(2x+1)}{2N}\right) \cos\left(\frac{\pi v(2y+1)}{2N}\right) \quad (3)$$

其中系数  $a(u), a(v)$  定义为:

$$a(i) = \begin{cases} 1, & i = 0 \\ \sqrt{2}, & i = 1, 2, \dots, N-1 \end{cases} \quad (4)$$

2) 嵌入隐藏信息  $W$ :

$$s^*(u, v) = s(u, v) + \alpha w_j \quad (5)$$

3) 实施逆变换得到隐藏信息后的图像  $I^*$ :

$$f^*(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{u=0}^{N-1} \sum_{v=0}^{N-1} a(u) a(v) s^*(u, v) \cdot \cos\left(\frac{\pi u(2x+1)}{2N}\right) \cos\left(\frac{\pi v(2y+1)}{2N}\right) \quad (6)$$

由于图像空间域数据是用整数表示的,因此用式(6)将频域数据逆变换成图像空间域数据时,实际还有一个取整的过程。由于取整的原因,在变换域隐藏信息后的空间域数据与式(6)的结果有一定的误差。这种空间域数据再变换成频域时,频域参数与刚嵌入信息而未经变换的频域参数同样会有所不同,如果这种改变超过了一个临界值,将使得提取的信息产生错误。

并且根据式(6)可知,如果不考虑取整的话,当一个变换域参数改变时,会影响该子块的所有空间域数据,这也是 DCT 隐藏算法对个别像素点的像素值的改变有较好的鲁棒性的主要原因。但如果考虑取整的话,根据式(4)和式(6)还可知,变换域参数的改变会相互造成干扰,因此当变换域参数修改较多时,由于取整的影响,即使图像不受任何压缩或噪声等攻击,也会导致提取的信息出现错误。根据式(4)和式(6)同样可知,这种相互干扰与  $u$  和  $v$  的大小有关, $u$  和  $v$  越小则相互干扰越严重。因此在不外界干扰的情况下,欲要正确提取所有隐藏信息的话,高频段的容量最大,中频段次之,低频段最小,也就是说要提高容量就要尽量选择高频段系数作为载体。

### 1.3 DCT 系数的压缩不变性对 DCT 载体系数选择的影响

在图像传送中,为提高传送速度和节省存储空间,都会在传送前进行一定的压缩,在这个压缩过程中,可能会造成隐藏信息的丢失,因此在选择 DCT 系数时必须考虑图像压缩对隐藏信息的影响。

JPEG 通过将 DCT 系数除量化表中的相应系数再取整来实现压缩,压缩过程所使用的量化表由式(7)所示的标准量化矩阵  $Q$  和品质因子  $q$  共同决定,根据不同的品质因子,在标准量化表上按一定的比例(由品质因子决定)进行缩放形成 DCT 压缩所需的量化表,比如独立 JPEG 组织 (Independent JPEG Group, IJG) 把品质因子进行变换,然后作为系数乘到标准量化表上,所得到的新量化表随品质因子的不同而不同,从而达到不同的压缩效果。IJG 提供的 JPEG 实现中采用了 1 到 100 的整数作为品质因子,100 表示最高质量(压缩后失真最小),1 表示最差质量(压缩后失真最严重)。

$$Q = \begin{bmatrix} 16 & 11 & 10 & 16 & 24 & 40 & 51 & 61 \\ 12 & 12 & 14 & 19 & 26 & 58 & 60 & 55 \\ 14 & 13 & 16 & 24 & 40 & 57 & 69 & 56 \\ 14 & 17 & 22 & 29 & 51 & 87 & 80 & 62 \\ 18 & 22 & 37 & 56 & 68 & 109 & 103 & 77 \\ 24 & 35 & 55 & 64 & 81 & 104 & 113 & 92 \\ 49 & 64 & 78 & 87 & 103 & 121 & 120 & 101 \\ 72 & 92 & 95 & 98 & 112 & 100 & 103 & 99 \end{bmatrix} \quad (7)$$

设品质因子为  $q$  ( $1 < q \leq 100$ ), IJG 首先做变换:

$$k = \begin{cases} 5000/q, & q < 50 \\ 200 - 2q, & 50 \leq q \leq 100 \end{cases} \quad (8)$$

再用  $k/100$  去乘标准量化表中的每一个数,四舍五入后把小于 1 的数变为 1,即得新的量化表。当  $q = 100$  时,量化矩阵中所有的量化系数都为 1,因此量化时只有 DCT 系数取整时存在的误差。

设  $F(u, v)$  是某幅图像  $X$  某个  $8 \times 8$  块 DCT 系数矩阵,  $Q_m$  是某预先选定的某个品质因子所对应的 JPEG 有损压缩量化表。对任意  $u, v = \{0, 1, \dots, 7\}$ , 定义  $\hat{F}(u, v) = \text{round}\left(\frac{F(u, v)}{Q_m(u, v)}\right) \cdot Q_m(u, v)$  及  $\tilde{F}(u, v) = \text{round}\left(\frac{\hat{F}(u, v)}{Q(u, v)}\right) \cdot Q(u, v)$ , 如果  $Q(u, v) \leq Q_m(u, v)$ , 则如下等式恒成立:

$$\text{round}\left(\frac{\hat{F}(u, v)}{Q_m(u, v)}\right) \cdot Q_m(u, v) = \hat{F}(u, v) \quad (9)$$

式(9)的证明如下:

由  $\tilde{F}(u, v) = \text{round}\left(\frac{\hat{F}(u, v)}{Q(u, v)}\right) \cdot Q(u, v)$  可得:

$$\tilde{F}(u, v) - \frac{1}{2}Q(u, v) \leq \hat{F}(u, v) \leq \tilde{F}(u, v) + \frac{1}{2}Q(u, v) \quad (10)$$

也即

$$\hat{F}(u, v) - \frac{1}{2}Q(u, v) \leq \tilde{F}(u, v) \leq \hat{F}(u, v) + \frac{1}{2}Q(u, v) \quad (11)$$

当  $Q(u, v) \leq Q_m(u, v)$  时, 可得:

$$\hat{F}(u, v) - \frac{1}{2}Q_m(u, v) \leq \tilde{F}(u, v) \leq \hat{F}(u, v) + \frac{1}{2}Q_m(u, v) \quad (12)$$

式(12)满足式(9), 因此根据式(12)可知式(9)成立。

式(9)表明: 如果对一个 DCT 系数  $F(u, v)$  以某个预定量步长  $Q_m$  进行量化得到的系数矩阵  $\hat{F}(u, v)$ , 若再用量化步长小于  $Q_m$  的量化矩阵  $Q$  进行量化, 则  $\hat{F}(u, v)$  仍可被精确重构。又由于品质因子越高, 量化步长则越小, 因此如果某幅图像经过某个预定品质因子的 JPEG 有损压缩后, 那么这幅压缩的图像可以在任何大于该预定品质因子的后续 JPEG 有损压缩后, 进行有效重构, 这就是 DCT 的压缩不变性。即只有在后续 JPEG 压缩品质因子小于选定值, DCT 系数才无法重构。因此不管选择哪些系数来隐藏信息, 只要嵌入强度大于压缩所用的量化步长, 均能保证嵌入的信息可靠提取, 而不是有些学者认为的嵌入在高频系数中的信息会在图像压缩中丢失。

#### 1.4 嵌入容量与 DCT 系数的选择

根据前面的分析可知, 在 DCT 域算法中, 如果要使算法有较好的鲁棒性, 需要尽量选择低频系数, 甚至直流系数, 但这种系数不能使用过多, 如果低频段的系数修改个数过多, 即使不受任何攻击, 隐藏的信息也没法全部正确提取。由此可知, 选择在低频段嵌入信息时, 嵌入容量非常有限, 也就是说在低频段嵌入信息只能应用于对鲁棒性要求高但对嵌入容量很低的应用场合。但根据 Watson 模型及 DCT 逆变换时系数相互之间的影响, 在 DCT 系数的高频段嵌入信息有较高的嵌入容量; 根据 JPEG 压缩不变性, 在高频段嵌入的信息与低频段嵌入的信息对最常见的压缩处理的鲁棒性是相同的; 根据标准量化矩阵还可知, 如果采用量化的方法并用各 DCT 系数对应的量化值为嵌入强度, 嵌入信息的不可感知性也不会随 DCT 系数的改变而出现明显的改变。因此可以得出结论: 在相同的抗压缩的鲁棒性和不可感知性约束条件下, 要有较高的嵌入容量, 就应选择高频 DCT 系数作为嵌入载体。

## 2 仿真实验与讨论

为检验不同 DCT 系数嵌入信息后的分析结论, 分别用

512 × 512 的 Lena 和 Mandrill 两幅标准测试图像进行嵌入和提取实验, 嵌入方法为嵌入信息量比较大的量化嵌入方法, 量化步长为品质因子为 75 时的 JPEG 压缩标准量化表。首先将图像划分成不相交 8 × 8 像素块, 再将每个 8 × 8 像素块进行 DCT 变换后, 将 DCT 系数按照 Zig-Zag 排列 (“之” 字型排列), 从不同的起始位置嵌入同样内容的 8 b 随机二进制信息, 然后图像从 DCT 域逆变换到我们视觉能理解的空间域图像, 最后再进行提取。在嵌入到提取的过程中除了嵌入和提取操作外, 还经历了逆 DCT 变换和 DCT 变换, 在这个处理过程有可能导致嵌入信息不能正确提取, 嵌入的信息越多, 提取时发生差错的概率越大。将秘密信息嵌入到 Lena 和 Mandrill 两幅标准测试图像在不同 DCT 系数起始位置后, 再进行提取的正确率分别如图 1 的实线和虚线所示。在嵌入有信息的 Lena 载密图像中加入 0.2% 的高斯噪声后, 再进行嵌入信息的提取, 嵌入前后提取的正确率分别如图 2 的实线和虚线所示。

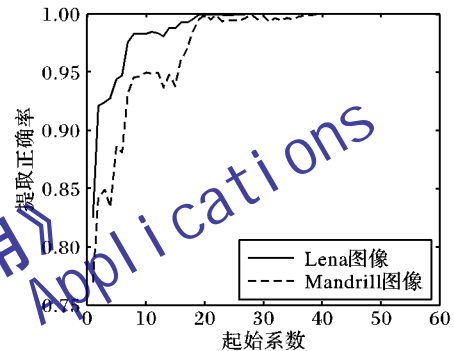


图1 不同图像嵌入信息提取正确率比较

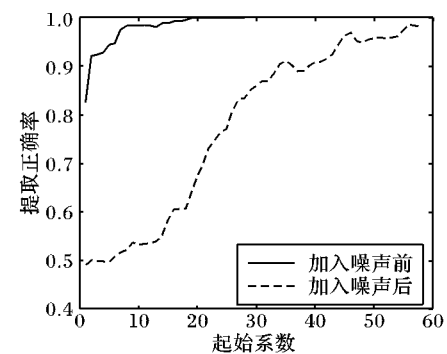


图2 载密文件加入噪声前后嵌入信息的提取正确率比较

衡量信息隐藏算法的指标主要有鲁棒性、不可感知性和隐藏容量, 考虑到当前广泛使用的采用峰值信噪比 (Peak Signal to Noise Ratio, PSNR) 不适合于衡量信息隐藏算法的优劣<sup>[8]</sup>, 为检验在不同 DCT 系数嵌入信息后载体图像的不可感知性, 分别采用文献[9]的结构性相似度和文献[10]的视觉失真感知函数对图像嵌入信息后的不可感知性进行检验, 发现在相同的嵌入容量下, 嵌入到高频段的 PSNR 比中低频段低, 发现结构性相似度和视觉失真感知函数值基本相同, 也就是就信息不管嵌入到哪些 DCT 系数, 只要嵌入强度一致, 其不可感知性基本不变。

根据图 1 所示的实验结果可知, 在同样不可感知性指标的约束下, 信息的最大嵌入容量, 不同图像均随着 DCT 系数从高频至低频依次减少。根据图 2 所示的实验比较结果可知, 虽然加入噪声后嵌入容量会明显下降, 但这种嵌入容量与嵌入位置的关系不因是否加入噪声而改变。

(下转第 974 页)



失败并记录日志。

实施 MBSPM 时,执行速度受影响的操作主要有系统启动、称重系统启动和文件打开等需要 TPM 或防篡改存储参与的操作,表 3 所示的测试结果表明,与不实施 MBSPM 相比,除系统启动时间增加不超过 50% 外,另外两种操作执行时间仅增加不超过 20%。

表 2 MBSPM 保护功能和性能实验结果

用户角色	操作	系统响应
r_MetrolAdm	修改秤容量	成功, 记录日志
r_Test	修改秤单位	失败, 记录日志
r_Test	修改量程参数	成功, 记录日志
无效角色	运行称重系统	失败, 记录日志
r_MetrolAdm	更改系统软件	系统不启动
r_MetrolAdm	更改固定法制相关模块	系统不启动
r_MetrolAdm	更改其他计量软件模块	称重启动失败, 记录日志

表 3 实施 MBSPM 对系统操作的影响

是否实施 MBSPM	消耗时间/s		
	称重应用启动	打开 1 MB 文件	系统启动
不实施	2.00	1.05	28
实施	2.50	1.20	40

#### 4 结语

基于开放计算平台的测量仪器软件保护是其推广应用有待解决的关键问题。MBSPM 基于角色-域-型访问控制实现灵活高效的权限分配,可将软件模块作为数据访问权限基本分配单位,采用强制访问控制实现软件和数据的分级保护,将法制相关软件分离、法制相关数据的访问保护和软件升级的保护管理转换成常规的数据访问授权,增强了模型的适应性。利用可信计算和防篡改安全存储保护计算机平台本身的

安全性,使基于计算机的测量仪器可满足软件完整性保护要求,其保护功能和运行效率表明所提出的模型为测量应用的软件保护和验证提供一条可行的途径。然而模型要求将保护机制加入操作系统内核,其计算平台目前仅限制为开源系统。未来将研究广泛使用的非开源 Windows 环境下测量应用的软件保护问题。

#### 参考文献:

- [1] 原和平,赵凯,赵燕.电子衡防作弊系统的研究与应用[J].中国有色金属,2008(4):54-56.
- [2] 单锦辉,姜瑛,孙萍.软件测试研究进展[J].北京大学学报:自然科学版,2005,41(1):134-145.
- [3] OIML. OIML D 31: General requirements for software controlled measuring instruments [S], 2008.
- [4] WELMEC 7.2 Issue 3, 2008, Software Guide (Measuring Instruments Directive 2004/22/EC) [S], 2008.
- [5] 张相铎,孙玉. Biba 模型中严格完整性政策的动态实施[J].计算机研究与发展,2005,42(5):746-754.
- [6] JI QINGGUANG, QING SIHAN, HE YEPING. A formal model for integrity protection based on DTE technique [J]. Science in China Series F: Information Sciences, 2006, 49(5):545-565.
- [7] 何建波,郭新,卿斯汉.一种基于 TE 技术实现 Clark-Wilson 模型的方法[J].电子学报,2008,36(2):216-223.
- [8] 司天歌,谭智勇,戴一青.一种对多级安全模型安全性的分析方法[J].计算机研究与发展,2008,45(10):1711-1717.
- [9] Trusted Computing Group [EB/OL]. [2010-09-22]. <http://www.trustedcomputinggroup.org/>.
- [10] REN JIANGCHUN, DAI KUI, WANG ZHIYING. Analysis and suggestion on TCG specifications [J]. Journal of Communication and Computer, 2006, 3(7):1-6.
- [11] 谭良,徐志伟.基于可信计算平台的信任链传递研究进展[J].计算机科学,2008,35(10):15-18.

(上接第 965 页)

#### 3 结语

隐藏容量、不可感知性和鲁棒性是信息隐藏系统的关键性指标之一,选择不同的 DCT 系数对 DCT 域隐藏算法的这些指标影响很大。如何选择系数才能使得 DCT 域信息隐藏算法有较好的性能,学者们有不同的看法,不过目前学者们主要考虑的是 DCT 系数对隐藏信息的鲁棒性的影响,而很少考虑对嵌入容量的影响。本文分析了不同 DCT 系数的视觉感知特性和 DCT 逆变换的相互干扰性对嵌入容量的影响,理论分析和仿真实验结果均表明嵌入容量随着 DCT 系数从高频至低频依次减少。进一步通过分析 JPEG 压缩不变性,得出了嵌入信息抗压缩的鲁棒性与嵌入位置无关的结论,利用这一结论还可将信息嵌入到随机选择(如利用混沌映射)的 DCT 系数上,在保持鲁棒性的前提下提高安全性。综合嵌入容量和鲁棒性两项指标,得出了在相同的抗压缩的鲁棒性和不可感知性约束条件下,要有较高的嵌入容量,就应选择高频 DCT 系数作为嵌入载体这一结论,可为研究有高嵌入容量要求的隐藏算法提供参考。

#### 参考文献:

- [1] 张秋余,刘洪国,袁占亭.基于图像局部稳定性的 LSB 隐藏信息检测算法[J].通信学报,2009,30(11):37-43.

- [2] ASLANTAS V. An optimal robust digital image watermarking based on SVD using differential evolution algorithm [J]. Optics Communications, 2009, 282(5):769-777.
- [3] 楼偶俊,钮旋.基于特征点模板的 Contourlet 域抗几何攻击水印算法研究[J].计算机学报,2009,32(2):308-316.
- [4] 肖亮,韦志辉.脊波域稳健性水印嵌入算法与可靠性分析[J].南京理工大学学报:自然科学版,2008,32(4):411-415.
- [5] COX I J, KILIAN J, LEIGHTON F T, et al. Secure spread spectrum watermarking for multimedia [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(12):1673-1687.
- [6] 黄继武,SHI Y Q,程卫东.DCT 域图像水印:嵌入对策与算法[J].电子学报,2000,28(4):57-60.
- [7] LIN C-C, SHIU P-F. DCT-based reversible data hiding scheme [J]. Journal of Software, 2010, 5(2):214-224.
- [8] 尤新刚,郭云彪,周琳娜.峰值信噪比不宜用来评价信息隐藏技术[C]//CIHW 2000/2001:全国第三届信息隐藏学术研讨会论文集.西安:西安电子科技大学出版社,2001:51-56.
- [9] 楼斌,沈海斌,赵武锋,等.基于失真模型的结构相似度图像质量评价[J].浙江大学学报:工学版,2009,43(5):864-868.
- [10] XIE JIANQUAN, XIE QING, HUANG DAZU, et al. Research on imperceptibility index of image information hiding [C]//NSWCTC: Proceedings of the 2th International Conference on Networks Security, Wireless Communications and Trusted Computing. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2010, 2:49-53.