

文章编号 : 1672-2892(2010)01-0079-05

基于 DCT 系数统计特性的 JPEG 图像隐写分析

徐志杰¹, 蔡晓霞²

(1. 汽车管理学院 干部轮训大队, 安徽 蚌埠 233011; 2. 电子工程学院 信息系, 安徽 合肥 230037)

摘 要: 提出了一种基于离散余弦变换(DCT)系数统计特性的 JPEG 图像隐写分析算法。该算法在分析 JPEG 图像 DCT 系数的统计特性的基础上, 提取了 8 维特征向量, 通过最小二乘支持向量机(LS-SVM)分类器对待测图像进行分类, 以达到检测载密图像的目的。算法实现简单, 计算复杂度低。实验结果表明, 该算法检测速度快, 具有较高的检测正确率, 能够实现针对各类 JPEG 图像信息隐写算法的有效检测。

关键词: 隐写分析; DCT 系数; 特征向量; JPEG 图像

中图分类号: TN919.81; TP391

文献标识码: A

Steganalysis for JPEG image based on statistical characteristics of DCT coefficients

XU Zhi-jie¹, CAI Xiao-xia²

(1. Cadre Rotational Training Brigade, Automotive Management Institute, Bengbu Anhui 233011, China;

2. Information Department, Electronic Engineering Institute, Hefei Anhui 230037, China)

Abstract: A steganalysis algorithm based on statistical characteristics of Discrete Cosine Transform (DCT) coefficients for Joint Photographic Experts Group(JPEG) image was proposed. The algorithm analyzed statistical characteristics of DCT coefficients, calculated a total of 8 dimensional feature vectors from each JPEG image, and classified cover and stego images using Least Squares Support Vector Machines(LS-SVM) classifier, therefore it could be applied to blind steganalysis. The algorithm could be implemented conveniently and computed easily. The experiments results showed that the algorithm had good performance in both detection rate and computation speed, and it was reliable in steganalysis for all kinds of JPEG images steganography.

Key words: steganalysis; DCT coefficients; feature vectors; JPEG image

信息隐写技术^[1]将通信内容嵌入到普通的载体文件(如图像、音频、文本文件)中进行传输, 以达到保密通信的目的。由于其具有不可感知和难以检测的特性, 近几年来受到广泛关注, 并逐渐应用于保密通信。

作为信息隐写的对抗性技术——隐写分析, 其目的是检测数字载体中秘密信息的存在性。一方面, 隐写分析可以促进信息隐写技术安全性的提高, 推动信息隐写技术的实用化; 另一方面, 有助于发现不法分子的秘密通信, 预防恐怖事件的发生, 维护国家和社会公共安全。

本文针对 JPEG 图像的各类信息隐写算法, 提出一种基于 DCT 系数统计特性的 JPEG 图像隐写分析方法。该方法对原始图像和载密图像的 DCT 系数进行统计分析, 提取了 8 个具有一定区分能力的特征参数组成特征向量, 并以此作为 LS-SVM 分类器的输入, 通过自学习的训练过程得到检测载密图像的分类器, 检测载密图像。

1 JPEG 图像隐写算法对 DCT 系数的影响

JPEG 是由 ISO/IEC 联合图像专家组指定的、适用于连续色调(包括灰度和彩色)静止图像压缩算法的国际标准^[2], 由于在获得高压缩率的同时能保持较好的图像质量, JPEG 成为网络和日常生活中使用最为普遍的图像格式, 以 JPEG 图像为载体的信息隐写技术应用越来越多, 受到了国内外学者的广泛关注。以 JPEG 图像为载体的信息隐写的基本流程如图 1 所示, 主要分为以下步骤:

收稿日期: 2009-02-03; 修回日期: 2009-11-02

- 1) 对经过 JPEG 压缩的原始图像(以下简称原始图像)进行熵解码,得到量化后的 DCT 系数;
- 2) 选择适合的 DCT 量化系数,以某种隐写算法嵌入需要隐藏的秘密信息;
- 3) 对嵌入秘密信息后的 DCT 量化系数进行熵编码,生成 JPEG 载密图像(以下简称载密图像)。

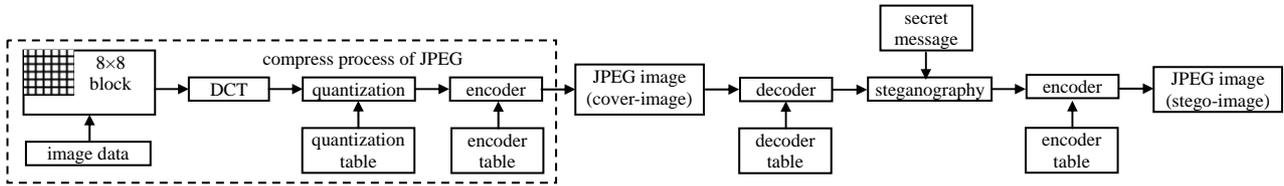


Fig.1 Program flow chart of steganography for JPEG image
图 1 JPEG 图像信息隐写算法的基本流程

由于以 JPEG 图像为载体的信息隐写技术(例如: Jsteg^[3], MB^[4], F3~F5^[5]等)大多选择将秘密信息嵌入量化后的 DCT 系数中,来达到信息隐藏和提取秘密信息的目的。因此, JPEG 图像中 DCT 量化系数(以下简称 DCT 系数)的统计分布问题一直为众多学者所关注。本文选取了 Lenna 和 Plane 两幅经过 JPEG 标准压缩的图像,以此为代表来分析一般原始图像的 DCT 系数的分布特性。两幅图像的尺寸大小为 512×512 ,质量因子为 75,均未嵌入任何秘密信息。如图 2 所示,给出了两幅原始图像及与它们相对应的 DCT 系数直方图。

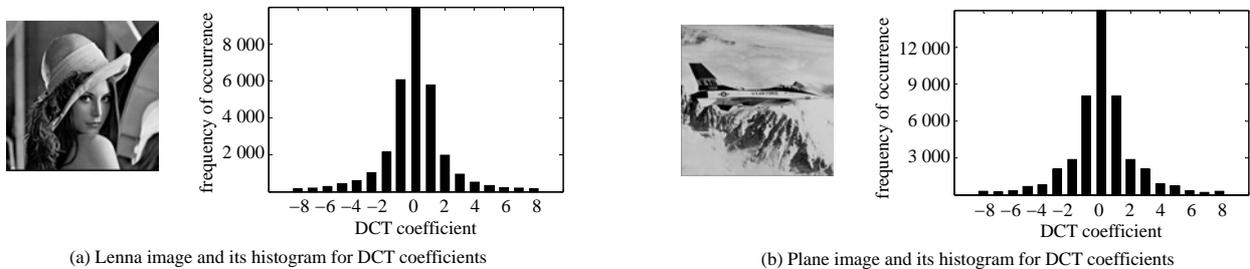


Fig.2 Comparison of histogram for DCT coefficients in different images
图 2 不同图像的 DCT 系数直方图的比较

当采用某种隐写算法对原始图像进行秘密信息嵌入后,原始图像的 DCT 系数的统计特性会被改变。仍以 Lenna 图像为例,采用 Jsteg, MB 和 F5 三种隐写算法嵌入不同比例的秘密信息,研究隐写前后 Lenna 图像 DCT 系数分布的变化(见表 1)。这里统计的是 DCT 系数值在 $[-5, 5]$ 区间上出现的次数。

表 1 Lenna 图像采用不同算法隐写前后的 DCT 系数值分布

Table 1 Histogram for DCT coefficients of different stego-images

image type	embedding rate /%	DCT coefficient										
		-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
cover image		429	596	1 041	2 139	6 057	235 185	5 770	1 973	941	506	337
Jsteg	70	383	783	861	3 518	4 675	235 185	5 766	1 653	1 262	451	393
	100	400	794	850	3 997	4 203	235 181	5 766	1 469	1 446	441	400
MB	70	420	781	861	3 484	4 713	235 182	4 480	3 262	758	694	305
	100	385	853	788	4 061	4 140	235 177	3 891	3 857	714	740	263
F5	70	403	510	865	1 766	6 834	235 184	6 429	1 628	781	461	291
	100	364	495	841	1 545	7 164	235 185	6 749	1 442	747	414	273

从表 1 中可见,三种隐写算法都不同程度地改变了 DCT 系数的分布;并且对于任意一种隐写算法,随着秘密信息嵌入比例的增大, DCT 系数分布的改变也愈加明显。

综上所述,以 JPEG 图像为载体的信息隐写技术在嵌入秘密信息时,将以不同的隐写规则修改 DCT 系数。一方面,这会导致 JPEG 图像的 DCT 系数分布发生变化,改变 JPEG 图像原有的统计特性;另一方面,也为基于统计特性的隐写分析提供了理论依据。

2 基于 DCT 系数统计特性的隐写分析算法

通常在进行信息隐写检测的研究时很难获得原始图像,但是 Fridrich 发现对解压缩后的载密图像进行 4×4 的剪裁,再按压缩时的量化表进行量化,可以构造出一幅统计特性与原始图像相近的参考图像(即预测图像)^[6]。基于 Fridrich 的预测图像理论,本文算法首先构造待测图像的预测图像,来获得原始图像的统计特性,然后通过比较待测图像及其预测图像的统计差异,来提取具有区别能力的特征参数。

2.1 统计特征的提取

本文基于 JPEG 图像 DCT 系数的统计特性,提取了 8 个统计特征参数用于检验待测图像是否含有秘密信息。首先假设: J_1 表示待测的 JPEG 图像, J_2 表示对该图像的预测图像, J_1 和 J_2 的大小为 $M \times N$, 可被分为 $\lfloor (M+7)/8 \rfloor \times \lfloor (N+7)/8 \rfloor$ 个 8×8 的块($\lfloor \cdot \rfloor$ 表示向下取整运算), $d_{j_1}(i, j)$ 和 $d_{j_2}(i, j)$ 分别代表 J_1 和 J_2 中的 DCT 系数值, 其中 $i=1, 2, \dots, M, j=1, 2, \dots, N$ 。

2.1.1 DCT 分块特性参数

DCT 分块特性参数是判断 JPEG 图像是否隐藏有信息的一个重要特征量。大多数的 JPEG 图像隐写算法都是将原始图像分为 8×8 的小块后, 以块为单位进行秘密信息的嵌入, 由于嵌入位置的不均匀, 会引起 DCT 块间的边界产生不连续性, 且嵌入信息越多, 不连续性越大。设想用 B_{DCT} 表示 DCT 块间的边界不连续性的测度, 计算公式如下:

$$B_{\text{DCT}} = \frac{\sum_{i=1}^{\lfloor (M-1)/8 \rfloor} \sum_{j=1}^N |d(8 \times i, j) - d(8 \times i + 1, j)| + \sum_{j=1}^{\lfloor (N-1)/8 \rfloor} \sum_{i=1}^M |d(i, 8 \times j) - d(i, 8 \times j + 1)|}{N \lfloor (M-1)/8 \rfloor + M \lfloor (N-1)/8 \rfloor} \quad (1)$$

分别从待测图像和预测图像中提取出 $B_{\text{DCT}}(J_1)$ 和 $B_{\text{DCT}}(J_2)$, 则可以得到一个新的用检验待测图像是否含有秘密信息的参数, 我们称之为 DCT 分块特性参数:

$$\Delta B_{\text{DCT}} = |B_{\text{DCT}}(J_1) - B_{\text{DCT}}(J_2)| \quad (2)$$

2.1.2 差分直方图参数

令 $H(d)$ 表示 DCT 系数值 d 的出现次数(DCT 系数直方图中 d 对应的柱条高度), 取 $H(-5) \sim H(5)$ 共 11 个值, 以 $H(0)$ 为中心, 向两边将每相邻的两个做差分, 并进行归一化。如式(3)所示:

$$h(d) = \begin{cases} [H(d+1) - H(d)] / \sum_{d=-5}^5 H(d), & d = -5, -4, \dots, -1 \\ [H(d) - H(d+1)] / \sum_{d=-5}^5 H(d), & d = 1, 2, \dots, 5 \end{cases} \quad (3)$$

得到了 DCT 系数的差分直方图分布频率 $h(d)$ ($d = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \pm 4, \pm 5, d \neq 0$)。图 3 给出了 Lenna 图像的差分直方图, 并且还和载密图像的差分直方图进行了比较。所用的载密图像以 Jsteg 算法分别嵌入了 50% 和 100% 比例的秘密信息。

从图中可以看到, 当以某种隐写算法嵌入秘密信息时, 会改变 $h(d)$ 的分布特性, 并且随着嵌入信息比例的增大, 改变的程度越严重。基于这点, 本文定义差分直方图参数如下:

$$HC = \sum |h_{j_1}(d) - h_{j_2}(d)| \quad (d = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \pm 4, \pm 5) \quad (4)$$

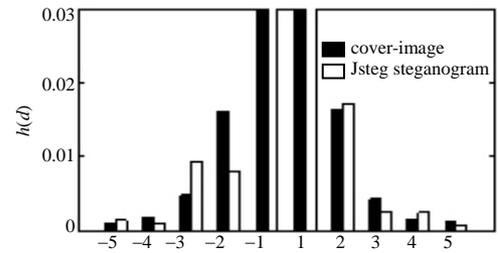
2.1.3 共生矩阵参数

对于一幅 JPEG 图像, 如果按照 Z 扫描的顺序将每个 8×8 块中的 DCT 系数进行编号, 则可以用 $d_{(i,j)}(l)$ 表示第 (i, j) 个块上 l 位置的 DCT 系数值, 其中 $l=0, 1, \dots, 63, i=1, 2, \dots, \lfloor (M+7)/8 \rfloor, j=1, 2, \dots, \lfloor (N+7)/8 \rfloor$ 。

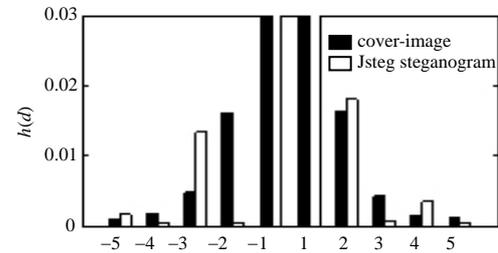
由于每个 DCT 块主对角线左上方区域的系数值较大, 常被选用于嵌入秘密信息, 因此本文选取每个块中 $l=0, 1, \dots, 14$ 上的 DCT 系数作为重要的研究对象, 并引入共生矩阵 $G(s, t)$ 来描述相邻 DCT 块的系数值对 (s, t) 的概率分布情况, 定义如下:

$$G(s, t) = \frac{\sum_{l=0}^{14} \sum_{i=1}^{\lfloor (M-1)/8 \rfloor} \sum_{j=1}^{\lfloor (N-1)/8 \rfloor} [(d_{(i,j)}(l) = s) \oplus (d_{(i,j+1)}(l) = t)]}{30 \times \lfloor (M-1)/8 \rfloor \times \lfloor (N-1)/8 \rfloor} + \frac{\sum_{l=0}^{14} \sum_{j=1}^{\lfloor (N-1)/8 \rfloor} \sum_{i=1}^{\lfloor (M-1)/8 \rfloor} [(d_{(i,j)}(l) = s) \oplus (d_{(i,j+1)}(l) = t)]}{30 \times \lfloor (M-1)/8 \rfloor \times \lfloor (N-1)/8 \rfloor} \quad (5)$$

让 $G_{s,t}(J_1), G_{s,t}(J_2)$ 分别表示待检测图像裁剪前后 J_1, J_2 的 $G(s, t)$, 令 $\Delta G_{s,t} = G_{s,t}(J_1) - G_{s,t}(J_2)$, 就得到了下面的 6 个共生矩阵参数:



(a) Difference histogram for DCT coefficients of Jsteg steganogram with 50% embedding rates



(b) Difference histogram for DCT coefficients of Jsteg steganogram with 100% embedding rates

Fig.3 Difference histogram for DCT coefficients of stegoimages with different embedding rates

图 3 Lenna 图像在不同嵌入率下采用 Jsteg 隐写前后的差分直方图

$$\begin{aligned}
\Delta S_{00} &= \Delta G_{0,0} \\
\Delta S_{01} &= \Delta G_{0,1} + \Delta G_{1,0} + \Delta G_{0,-1} + \Delta G_{-1,0} \\
\Delta S_{02} &= \Delta G_{0,2} + \Delta G_{2,0} + \Delta G_{0,-2} + \Delta G_{-2,0} \\
\Delta S_{11} &= \Delta G_{1,1} + \Delta G_{1,-1} + \Delta G_{-1,1} + \Delta G_{-1,-1} \\
\Delta S_{22} &= \Delta G_{2,2} + \Delta G_{2,-2} + \Delta G_{-2,2} + \Delta G_{-2,-2} \\
\Delta S_{12} &= \Delta G_{1,2} + \Delta G_{1,-2} + \Delta G_{-1,2} + \Delta G_{-1,-2} + \Delta G_{2,1} + \Delta G_{2,-1} + \Delta G_{-2,1} + \Delta G_{-2,-1}
\end{aligned} \tag{6}$$

这 6 个共生矩阵参数同样用于检验待测图像是否含有秘密信息。

2.2 LS-SVM 分类器

支持向量机(Support Vector Machine, SVM)^[7]是一种基于结构风险最小化准则的学习方法,由于在解决小样本、非线性及高维模式识别问题中表现出许多特有的优势,所以被广泛应用到模式识别、样本分类等许多方面。其中的最小二乘支持向量机(Least Squares Support Vector Machine, LS-SVM)性能尤为突出,不仅大大降低了计算的复杂度,而且在实际应用中可以保持较高的分类准确度。由于径向基函数具有较好的分类特性^[1],因此本文选用 LS-SVM 作为检测 JPEG 载密图像的分类器。径向基函数内核(RBF)公式如下:

$$K(x, x_i) = \exp \left\{ -\frac{\|x - x_i\|_2^2}{\sigma^2} \right\} \tag{7}$$

本文算法的实质就是对每幅待测图像进行统计分析,提取上面的特征参数构成一个 8 维的特征向量,将该向量输入设计好的 LS-SVM 分类器,即可检测出图像是否含有秘密信息。

3 实验与结果分析

构建实验所用的测试图像库,其中包含原始图像库和载密图像库两部分。将 250 幅原始数码照片统一处理成大小为 512×512 、质量因子为 75 的灰度 JPEG 图像,作为实验用的原始图像库。然后,以每幅图像所能嵌入的最大数据长度为衡量标准,采用 3 种(Jsteg,MB,F5)信息隐写算法,分别嵌入最大数据长度 10%,20%,...,100% 比例的秘密信息,得到载密图像库。每次选取 250 张原始图像和某一算法(Jsteg,MB 或 F5)在某种嵌入比例下(如 40%)的载密图像 250 张,按照训练样本与测试样本 4:1 的比例进行分类,研究 3 种隐写算法在不同嵌入比例下的检测性能。由于径向基函数(RBF)具有较好的分类能力,因此本文选取它作为 LS-SVM 分类器的核函数。为了测试算法的稳定性,设定参数 $\gamma=1:1:10$, $\sigma^2=1:1:10$,运行得到不同参数组合下的 100 组实验数据,根据以下公式:

$$\text{检测正确率} = \frac{\text{被正确判断的测试样本的个数}}{\text{测试样本的个数}} \times 100\% \tag{8}$$

计算出每组实验得到的检测正确率,将所有的检测正确率的数值相加并除以 100,就得到了平均检测正确率,平均每次运算时间为 1.3 s。实验结果如表 2 所示。

表 2 针对不同隐写方法在不同嵌入率下的平均检测正确率
Table 2 Average detection rate of three steganographies with different embedding rates

embedding algorithm	embedding rate /%									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Jsteg	74.1	81.7	87.7	88.8	95.0	96.7	97.7	98.2	98.6	98.8
MB	77.3	82.2	87.0	91.2	93.6	96.2	96.8	97.3	97.9	97.9
F5	62.9	69.4	75.9	83.2	87.2	90.5	92.5	93.5	94.4	95.1

从表 2 中可以看出:对于每一种隐写方法,随着信息嵌入比例的增大,平均检测正确率也都会增大;而对于信息嵌入率大于 50% 的载密图像库, Jsteg 和 MB 测试样本的平均检测正确率均可达到 90% 以上, F5 测试样本的平均检测正确率可达到 85% 以上。由此可见,本文提出的算法在提取特征参数较少的情况下,针对各类载密图像仍然能获得很高的正确检测率。总的来说,该算法具有良好的检测性能,能够有效实现对各种 JPEG 图像隐写算法的正确检测。

4 结论

本文通过分析 JPEG 图像 DCT 系数的分布特性,提出了一种基于 DCT 系数统计特性的 JPEG 图像隐写分析方法。实验结果表明,该方法实现简单,检测速度快,检测正确率高,在实时检测中具有重要的应用价值。

参考文献:

- [1] 王丽娜,郭迟,李鹏. 信息隐藏技术实验教程[M]. 武汉:武汉大学出版社, 2004.
- [2] 王朔中,张新鹏,张开文. 数字密写和密写分析——互联网时代的信息战技术[M]. 北京:清华大学出版社, 2005.
- [3] Upham D. JPEG-JSteg-V4[CP/OL]. (1993-05-25)[2009-11-02]. <http://www.funet.fi/pub/crypt/steganography/jpeg-jsteg-v4.diff.gz>.
- [4] Sallee P. Model-Based Steganography[C]// Proceedings of International Workshop on Digital Watermarking. Berlin: Springer-Verlag, 2004:154-167.
- [5] Westfeld A. F5-a steganography algorithm: high capacity despite better steganalysis[C]// Proceedings of 4th Information Hiding International Workshop. Berlin: Springer-Verlag, 2001,LNC2137:289-302.
- [6] Fridrich J,Goljan M,Hogea D. Steganalysis of JPEG Images: Breaking the F5 Algorithm[C]// Proceedings of the 5th Information Hiding Workshop. Berlin: Springer-Verlag, 2002:310-323.
- [7] Pevny T,Fridrich J. Towards Multi-Class Blind Steganalyzer for JPEG Images[C]// Proceedings of International Workshop on Digital Watermarking. Berlin: Springer-Verlag, 2005:39-53.

作者简介:



徐志杰(1984-),男,安徽省合肥市人,在读硕士研究生,从事通信与信息系统研究,email:xuzhijie0619@yahoo.com.cn.

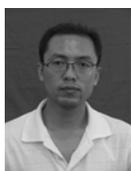
蔡晓霞(1965-),女,安徽省淮南市人,博士,教授,主要从事通信与信息系统研究.

(上接第78页)

参考文献:

- [1] McAulay R J,Malpass M L. Speech enhancement using a soft decision noise suppression filter[J]. IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing, 1980,28(2):137-145.
- [2] Y Ephraim,Malah D. Speech enhancement using a minimum mean-square error short-time spectral amplitude estimator[J]. IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing, 1984,32(6):1109-1121.
- [3] Ephraim Y,Cohen I. Recent advancements in speech enhancement in The Electrical Engineering Handbook[EB/OL]. Boca Raton,FL:CRC,2004. <http://ece.gmu.edu/~yephraim/ephraim.html>.
- [4] Chang J H,Kim N S,Mitra S K. Voice activity detection based on multiple statistical models[J]. IEEE Trans. Signal Process., 2006,54(6):1965-1976.
- [5] Chang J H,Kim N S. Speech enhancement:New approaches to soft decision[J]. IEICE Trans. Inf. Syst., 2001,E84-D(9):1231-1240.
- [6] Sohn J,Kim N S,Sun W g. A statistical model-based voice activity detection[J]. IEEE Signal Process.Lett., 1999,6(1):1-3.
- [7] Martin R. Noise power spectral density estimation based on optimal smoothing and minimum statistics[J]. IEEE. Trans. Speech Audio Processing, 2001,9(5):504-512.

作者简介:



冯炎(1979-),男,山西省吕梁市人,在读硕士研究生,主要研究方向为语音信号处理. email:fy4528@163.com.