

基于噪声模型和通道融合的彩色图像隐写分析

綦科^{1,2} 谢冬青¹

¹(广州大学计算机科学与教育软件学院 广州 510006)

²(网络与数据安全四川省重点实验室 成都 611731)

(qikersa@163.com)

Steganalysis of Color Images Based on Noise Model and Channels Integration

Qi Ke^{1,2} and Xie Dongqing¹

¹(College of Computer Science and Education Software, Guangzhou University, Guangzhou 510006)

²(Sichuan Province Key Laboratory of Network and Data Security, Chengdu 611731)

Abstract Steganalysis of color images weaken or ignore the correlation among different color channels by only using single signal channel. The noise model of stego color images is analyzed, and a general steganalysis algorithm based on noise model and color channels integration is proposed. Firstly, the wavelet decomposition of the image is made, and a filtering operation is applied to obtain the wavelet subbands of noise image. Secondly, noise gradient orientation sequences between any two noise channels and noise gradient sum sequence are extracted from the noise wavelet subbands. Thirdly, color gradient orientation sequences between any two channels and color gradient sum sequence are extracted from the color image. Finally, the Hilbert-Huang transform based vibration features of these sequences are integrated as eigenvectors, and SVM is used to detect images. The experimental results show that the proposed technique realizes the reliable steganalysis of color images with higher correct rate and lower false positive rate, compared with traditional color image steganalysis algorithms.

Key words color image steganalysis; noise model; channels integration; gradient sum sequence; gradient orientation sequence

摘要 彩色图像的隐写分析大多在单信号通道进行, 弱化或忽略了彩色图像不同颜色通道的相关性。通过分析彩色图像隐写噪声模型, 提出了基于噪声模型和通道融合的通用彩色图像隐写分析算法。算法基于小波滤波, 得到待检测图像的噪声小波系数子带, 从该类子带中提取刻画噪声通道融合特征的噪声梯度方向序列及噪声梯度和序列, 结合描述彩色图像颜色通道融合特征的颜色梯度方向序列及颜色梯度和序列, 应用 HHT 变换提取各序列的振荡特征, 构建基于 Hilbert 谱的特征向量, 应用 SVM 分类器进行分类判别。实验表明, 与已有的彩色图像隐写分析算法比较, 所提出的算法误检率低, 具有更好的检测效果。

关键词 彩色图像通用隐写分析; 噪声模型; 通道融合; 梯度和序列; 梯度方向序列

中图分类号 TP309

收稿日期: 2011-09-14; 修回日期: 2012-02-21

基金项目: 广东省自然科学基金项目(S2012010010004); 广州市科技计划基金项目(12C042011790); 网络与数据安全四川省重点实验室

2011 开放项目; 广东省高等院校高层次人才项目

彩色图像在现实世界和网络中的大量存在,以彩色图像为载体的隐写发展迅速.现有彩色图像隐写按照信息嵌入方法可分为空域隐写和变换域隐写.典型的彩色图像空域算法有 LSB 算法^[1]、随机调制算法^[2]等,变换域算法有基于 DCT 变换^[3]和基于 DWT 变换^[4]的算法等,大多数算法仅在 BMP 彩色图像的 RGB 的单颜色通道隐藏信息,或在 YUV 或 HSI 颜色空间的亮度和色度分量等单通道中隐藏信息.

彩色图像的隐写分析也分为专用隐写分析和通用隐写分析.专用隐写分析是针对某种特定彩色图像隐写的检测,如:Lee 等人^[5]提出 Color Cube 方法检测彩色图像 LSB 隐写;Kong 等人^[6]提出利用彩色图像 HIS 颜色空间的色度分量进行隐写分析;陈铭等人^[7]提出基于区域相关性的 LSB 匹配隐写分析.通用隐写分析则是在检测过程中无需载体知识和隐写算法细节的检测,如:黄方军等人^[8]提出全局和局部校准相结合的通用型 JPEG 隐写分析,应用 Markov 转移概率矩阵提取 $4 \times (2T+1)^2$ 维(其中 T 为 JPEG 系数矩阵截断阈值)的 DCT 域特征,检测 JPEG 图像是否含密;陈丹等人^[9]分别从彩色图像的亮度和色度角度选择特征,从亮度分量提取 3 级小波分解系数统计量和系数误差统计量,然后通过矢量方向滤波技术对彩色图像进行方向化处理,并以滤波前后图像之间的矢量方向相关度来度量色度的改变量,构造了 49 个分类特征向量进行盲隐写分析;毛家发等人^[10]提出基于攻击的彩色图像通用隐写分析,分别对 RGB 三个颜色通道提取空域梯度能量以及在亮度空间提取 DCT 系数能量,对于空域图像的两个特征,是由梯度能量特征和经平滑攻击后梯度能量比特征组成;对于 JPEG 图像的两个特征,是由图像能量特征和经再压缩攻击后的图像能量差特征构成;孙文颀等人^[11]依据隐写导致图像 DCT 系数分布、空域像素值平坦性以及颜色空间一致性的改变,提取 DCT 系数分布模型背离程度、空域相关性和色度分量相关性等 10 维特征,检测彩色 JPEG 图像是否含密,仅适用于 JPEG 图像;毛家发等人^[12]提出基于净图描述的彩色图像通用隐写算法,在彩色图像的 R,G,B 三个通道分别提取纹理特征和虚特征值特征,共 150 维特征,经过特征降维后检测彩色图像是否含密.

以上彩色图像通用隐写分析算法在隐写检测时,对彩色图像逐通道提取 RGB 通道的特性,或者在 YUV 或 HSI 颜色空间的亮度和色度分量提取特

征,忽视或弱化了颜色通道的相关性.针对上述不足,本文分析隐写嵌入对彩色图像及其小波域噪声模型的通道融合特征的影响,从小波滤波后得到的彩色图像噪声小波系数子带,提取刻画噪声通道融合特征的噪声梯度方向序列及噪声梯度和序列,结合描述彩色图像颜色通道融合特征的颜色通道梯度方向序列及颜色梯度和序列,联合构造统计量,提出了基于噪声模型和通道融合彩色图像通用隐写分析算法.实验证明本文提出的算法具有较高的彩色图像隐写检测准确率和较低的虚警率.

1 图像隐写的噪声模型

图像信号在采样、数字化和传输过程中会被添加各种噪声,噪声与原始图像信号融合,合成含噪图像.这种含噪图像为隐写提供了冗余空间,许多隐写算法利用这种冗余噪声,将秘密信息伪装成噪声并嵌入到原始图像中,合成隐写图像,从而达到信息隐藏的目的.

一般地,从统计特征保持和安全性角度考虑,隐写常常对待隐藏信息进行加密和随机化处理,使其近似服从均匀分布或高斯分布,并且与载体图像独立分布,可以视为随机白噪声,并且嵌入位置也是通过伪随机序列进行随机选择,因此,无论是空域隐写或变换域隐写,图像隐写都可以用加性噪声模型来刻画,隐写过程可以看作是在载体图像随机选取的位置叠加随机噪声的过程.如果能捕捉待检测图像噪声在隐写嵌入前后的差异特征,结合从待检测图像中提取的对隐写嵌入敏感的其他统计特征,将能对图像进行有效的隐写检测.

2 基于小波滤波的彩色图像噪声提取

隐写对原始彩色图像进行了修改,可以用加性噪声模型刻画,如果能有效地分离原始图像和噪声信号,从分离出的噪声信号中提取特征对图像进行检测,将能降低图像内容对检测算法性能的影响,从而提高检测性能.因此,本文考虑在小波域中提取噪声信号,对彩色图像各通道小波分解得到的高频子带系数进行高通滤波,从滤波后得到的噪声小波子带系数中提取对信息嵌入敏感的统计特征,结合从彩色图像中提取的对隐写嵌入敏感的其他统计特征,联合用于彩色图像的隐写分析.

如文献^[13-14]所述,小波阈值收缩滤波去噪法

在最小均方意义下可达近似最优,是一种较好的滤波方法.该方法首先对信号进行小波变换,然后通过设置适当的阈值,将小波变换系数与阈值作比较,小于阈值的系数置零,大于阈值的系数保留,并经阈值函数映射为该系数的估值;最后对所得的系数估值进行逆变换,从而实现去噪.在去噪过程中,信号的小波系数用式(1)进行估计:

$$w_d = \begin{cases} w_t, & |w_t| > T; \\ 0, & |w_t| \leq T. \end{cases} \quad (1)$$

其中, w_t 和 w_d 分别为原始图像和去噪图像的小波系数, T 为阈值, $T = \sigma_{\text{noise}} \sqrt{2 \ln S}$, 这里 σ_{noise} 为噪声信号的标准差, S 为信号的长度.

为了去除原始信号,获得噪声信号,反向应用式(1),得到噪声的小波子带系数 w_n :

$$w_n = \begin{cases} w_t, & |w_t| \geq T; \\ 0, & |w_t| < T. \end{cases} \quad (2)$$

常用的阈值函数包括硬阈值函数和软阈值函数,由于软阈值会丢失掉信号的某些特征,而硬阈值可以更好地保留信号的特征,因此本文选用硬阈值函数,以便更好地保留噪声的特征,目的就是为了得到噪声的小波系数,并从中提取对图像变化敏感的特征.

在 RGB 颜色通道分别进行小波分解,对各通道的高频子带系数应用上述反向小波阈值收缩滤波去噪法进行高通滤波,得到彩色图像 3 通道噪声小波子带系数,称为彩色图像小波子带噪声图 $\sigma(x, y)$, 表示为 $\sigma(x, y) = (\sigma_1(x, y), \sigma_2(x, y), \sigma_3(x, y))$, 其中 $\sigma_1(x, y), \sigma_2(x, y), \sigma_3(x, y)$ 分别表示 R, G, B 颜色通道的噪声小波子带系数.

3 通道融合特征

彩色图像的 Mumford-Shah 模型^[15]将彩色图像建模为黎曼流形上的嵌入曲面,引入刻画各颜色通道间梯度差异总和的数量积项和梯度方向差异的向量积项,使各通道耦合在一起,体现了彩色图像通道相关性融合特征,本文提取并扩展模型中描述相关性融合特征的数据项,将其应用于隐写分析.

根据文献^[15],对彩色图像 $u(x, y) = (u_1(x, y), u_2(x, y), u_3(x, y))$, 将其建模为 \mathbb{R}^5 中的嵌入曲面 $(x, y, u_1(x, y), u_2(x, y), u_3(x, y))$, 其中 $u_1(x, y), u_2(x, y), u_3(x, y)$ 分别表示 R, G, B 颜色分量值. 设 $M \times N$ 彩色图像 $u(x, y)$ 横向颜色梯度与纵向颜色梯度分别为第 $i (i \in \{1, 2, 3\})$ 颜色通道横向

相邻像素间和纵向相邻像素间之间的差值,即

$$u_{i,x} = \begin{cases} u_i(x, y) - u_i(x-1, y), & x \in [2, N], y \in [1, M]; \\ u_i(x, y) - u_i(N, y), & x = 1, y \in [1, M]. \end{cases} \quad (3)$$

$$u_{i,y} = \begin{cases} u_i(x, y) - u_i(x, y-1), & y \in [2, M], x \in [1, N]; \\ u_i(x, y) - u_i(x, M), & y = 1, x \in [1, N]. \end{cases} \quad (4)$$

数量积 $|\nabla u_{x,y}|^2 = \sum_{i=1}^3 u_{i,x}^2 + \sum_{i=1}^3 u_{i,y}^2$, 向量积 $|u_x \times u_y|^2 = (u_{1,x}u_{2,y} - u_{2,x}u_{1,y})^2 + (u_{1,x}u_{3,y} - u_{3,x}u_{1,y})^2 + (u_{2,x}u_{3,y} - u_{3,x}u_{2,y})^2$.

数量积 $|\nabla u_{x,y}|$ 描述所有颜色通道梯度差异的总和,向量积 $|u_x \times u_y|$ 的作用就是对颜色通道间方向梯度差异的总和进行刻画,两项都刻画了 R, G, B 颜色通道间的相关性融合的特征.

对于彩色图像小波子带噪声图 $\sigma(x, y)$, 由于隐写过程可以用加性噪声模型刻画,则 $\sigma(x, y)$ 的各通道噪声小波系数可以用加性模型建模:

$$\sigma'_i(x, y) = \sigma_i(x, y) + z_i(x, y), \quad i \in \{1, 2, 3\}, \quad (5)$$

其中, $\sigma'_i(x, y)$ 为隐写后得到的彩色图像各通道噪声小波系数, $\sigma_i(x, y)$ 为原始彩色图像的各通道噪声小波系数, $z_i(x, y)$ 为信息嵌入引入的各通道噪声小波系数,且 $\sigma_i(x, y)$ 与 $z_i(x, y)$ 独立分布,均近似服从均匀分布或高斯分布.

设 $M \times N$ 的彩色图像小波噪声图 $\sigma(x, y)$, 也以差分形式计算其第 $i (i \in \{1, 2, 3\})$ 通道的噪声系数横向梯度与纵向梯度:

$$\sigma_{i,x} = \begin{cases} \sigma_i(x, y) - \sigma_i(x-1, y), & x \in [2, N], y \in [1, M]; \\ \sigma_i(x, y) - \sigma_i(N, y), & x = 1, y \in [1, M]. \end{cases} \quad (6)$$

$$\sigma_{i,y} = \begin{cases} \sigma_i(x, y) - \sigma_i(x, y-1), & y \in [2, M], x \in [1, N]; \\ \sigma_i(x, y) - \sigma_i(x, M), & y = 1, x \in [1, N]. \end{cases} \quad (7)$$

数量积 $|\nabla \sigma_{x,y}|^2 = \sum_{i=1}^3 \sigma_{i,x}^2 + \sum_{i=1}^3 \sigma_{i,y}^2$, 向量积 $|\sigma_x \times \sigma_y|^2 = (\sigma_{1,x}\sigma_{2,y} - \sigma_{2,x}\sigma_{1,y})^2 + (\sigma_{1,x}\sigma_{3,y} - \sigma_{3,x}\sigma_{1,y})^2 + (\sigma_{2,x}\sigma_{3,y} - \sigma_{3,x}\sigma_{2,y})^2$.

数量积 $|\nabla \sigma_{x,y}|$ 描述所有噪声通道内梯度差异的总和,向量积 $|\sigma_x \times \sigma_y|$ 对噪声通道间方向梯度差异的

总和进行刻画,两项都刻画了R,G,B噪声通道之间的相关性融合的特征.

4 基于噪声模型和通道融合的彩色图像隐写分析算法

4.1 通道融合特征分析

自然彩色图像的R,G,B三颜色通道之间有着强相关性(B-R:0.78,R-G:0.98,G-B:0.94),各个方向上的相邻像素间也有很强的相关性^[16].彩色图像隐写在R,G,B的颜色通道隐藏信息,或在变换后的灰度或亮度信号等通道中隐藏信息,信息嵌入势必改变某些像素颜色值,从而必然对R,G,B三颜色通道的相关性造成影响;反映到小波域,必然对彩色图像小波噪声图 $\sigma(x,y)$ 的3噪声通道相关性造成影响.

对于彩色图像 $u(x,y)$,颜色通道间的相关性通过颜色梯度的差分形式综合体现在 $|\nabla u_{x,y}|$ 和 $|u_x \times u_y|$ 中,而隐写嵌入会改变颜色通道间的相关性,必然导致 $|\nabla u_{x,y}|$ 和 $|u_x \times u_y|$ 发生变化.由于 $|u_x \times u_y|$ 子项 $(u_{1,x}u_{2,y} - u_{2,x}u_{1,y})$, $(u_{1,x}u_{3,y} - u_{3,x}u_{1,y})$, $(u_{2,x}u_{3,y} - u_{3,x}u_{2,y})$ 分别表示每2个颜色通道(B-R,R-G,G-B)间方向梯度的差异,因此,我们分别提取上述3个子项,结合 $|\nabla u_{x,y}|$,共4项用于度量彩色图像颜色通道间的相关性.由于采用了差分形式,其对相关性的变化具有高敏感性.

定义1. $M \times N$ 彩色图像 $u(x,y)$ 的颜色梯度和为 $p=(p_{x,y})$,其中 $p_{x,y}=|\nabla u_{x,y}|^2(x \in [1,N], y \in [1,M])$; p 从左到右,从上到下排列所构成的长度为 $M \times N$ 的一维序列为彩色图像 $u(x,y)$ 的颜色梯度和序列 P .

定义2. $M \times N$ 彩色图像 $u(x,y)$ 任意2颜色通道间的 r 阶颜色梯度方向定义为 $q_i^r=(q_{i,x,y}^r)$,其中 $q_{i,x,y}^r=(u_{i,x}u_{(i+1) \bmod 3,y} - u_{(i+1) \bmod 3,x}u_{i,y})^r(x \in [1,N], y \in [1,M], i \in [1,3])$; q_i^r 从左到右,从上到下排列所构成的长度为 $M \times N$ 的一维序列为彩色图像 $u(x,y)$ 的 r 阶颜色梯度方向序列 $Q_i^r(i \in [1,3])$.

同理,对于彩色图像小波子带噪声图 $\sigma(x,y)$,噪声通道间的相关性可以通过噪声梯度的差分形式综合体现在 $|\nabla \sigma_{x,y}|$ 和 $|\sigma_x \times \sigma_y|$ 中,而隐写嵌入会改变噪声通道间的相关性,必然导致 $|\nabla \sigma_{x,y}|$ 和 $|\sigma_x \times \sigma_y|$ 发生变化.提取 $|\nabla \sigma_{x,y}|$, $(\sigma_{1,x}\sigma_{2,y} - \sigma_{2,x}\sigma_{1,y})$, $(\sigma_{1,x}\sigma_{3,y} - \sigma_{3,x}\sigma_{1,y})$, $(\sigma_{2,x}\sigma_{3,y} - \sigma_{3,x}\sigma_{2,y})$ 共4个子项,用于度量噪声通道间的相关性.

定义3. $M \times N$ 彩色图像小波噪声图 $\sigma(x,y)$ 的噪声梯度和为 $j=(j_{x,y})$,其中 $j_{x,y}=|\nabla \sigma_{x,y}|^2(x \in [1,N], y \in [1,M])$; j 从左到右,从上到下排列所构成的长度为 $M \times N$ 的一维序列为彩色图像小波噪声图 σ 的噪声梯度和序列 J .

定义4. $M \times N$ 彩色图像小波噪声图 $\sigma(x,y)$ 任意2通道间的 r 阶噪声梯度方向定义为 $k_i^r=(k_{i,x,y}^r)$,其中 $k_{i,x,y}^r=(\sigma_{i,x}\sigma_{(i+1) \bmod 3,y} - \sigma_{(i+1) \bmod 3,x}\sigma_{i,y})^r(x \in [1,N], y \in [1,M], i \in [1,3])$; k_i^r 从左到右,从上到下排列所构成的长度为 $M \times N$ 的一维序列为彩色图像小波噪声图 σ 的 r 阶噪声梯度方向序列 $K_i^r(i \in [1,3])$.

4.2 梯度和序列及2阶梯度方向序列分析

对于彩色图像 $u(x,y)$,每个像素可以通过它的位置和颜色的特征来刻画.不同图像中存在不同的图像区域(形状)和内容边界,平坦区域具有均匀的亮度和相同的颜色属性,而非平坦区域具有非均匀的亮度和不同的颜色属性.由于随机变化的原因,图像在本质上是统计性的^[16],即图像特性随着图像平面中绝对位置的不同而变化,因此图像的特性可以用随机过程来描述.由颜色梯度的定义,颜色梯度为相邻像素之间的某通道颜色之差,因此作为图像特征之一的颜色梯度也随着图像像素位置和颜色不同,随着图像形状和边界的变化而呈现非线性和非平稳的随机性,其颜色梯度方向序列 Q_i^r 及颜色梯度和序列 P 可以看作非平稳的随机序列.同理,彩色图像小波噪声图 $\sigma(x,y)$ 的噪声梯度方向序列 K_i^r 及噪声梯度和序列 J 也可以看作非平稳的随机序列.

4.2.1 空域隐写对序列 $P, J, Q_i^r, K_i^r(r=2)$ 的影响

对 $M \times N$ 彩色图像 $u(x,y)$,计算信息嵌入后的横向颜色梯度:

$$\begin{aligned} u'_{i,x} &= u'_i(x,y) - u'_i(x-1,y) = \\ & (u_i(x,y) + q_i(n)) - (u_i(x-1,y) + q_i(n-1)) = \\ & u_{i,x} + r_{i,x}(n), \end{aligned} \quad (8)$$

其中, $q_i(n)$ 为像素嵌入量($q_i(n) = \beta \times w_{x,y}$ 或 $u_{i(x,y)} \times \beta \times w_{x,y}$); $r_{i,x}(n)$ 为相邻像素嵌入量的横向差值.

计算信息嵌入后的纵向颜色梯度:

$$u'_{i,y} = u_{i,y} + r_{i,y}(n), \quad (9)$$

其中, $r_{i,y}(n)$ 为相邻像素嵌入量的纵向差值.

记非掩密和掩密彩色图像的颜色梯度和序列为 P_H 和 P_C ,那么:

P_H 的均值为

$$E(P_H) = \frac{1}{M \times N} \sum E \left[\sum_{i=1}^3 u_{i,x}^2 + \sum_{i=1}^3 u_{i,y}^2 \right]. \quad (10)$$

P_C 的均值为

$$E(P_C) = \frac{1}{M \times N} \sum E \left[\sum_{i=1}^3 (u'_{i,x})^2 + \sum_{i=1}^3 (u'_{i,y})^2 \right] = \frac{1}{M \times N} \sum E \left[\sum_{i=1}^3 (u_{i,x} + r_{i,x}(n))^2 + \sum_{i=1}^3 (u_{i,y} + r_{i,y}(n))^2 \right]. \quad (11)$$

一般地,待嵌入信息在嵌入前通过扩频、加密、纠错编码等方式进行置乱变换或随机调制,使待嵌入信息具有随机性;同时,嵌入位置也是通过伪随机序列进行随机选择;并且待嵌入信息与载体图像独立分布,因此,不失一般性, $u_{i,x}$ 与 $r_{i,x}(n)$ 统计独立, $u_{i,y}$ 与 $r_{i,y}(n)$ 统计独立,即 $E(u_{i,x} \times r_{i,x}(n)) = E(u_{i,x}) \times E(r_{i,x}(n))$, $E(u_{i,y} \times r_{i,y}(n)) = E(u_{i,y}) \times E(r_{i,y}(n))$.再者, $u_{i,x}$ 和 $u_{i,y}$ 分别为水平和垂直方向的相邻像素颜色通道的差分,一般认为差分图像服从均值为0的高斯分布或拉普拉斯分布^[17],即 $E(u_{i,x}) = E(u_{i,y}) = 0$,因此,式(11)可以写为

$$E(P_C) = E(P_H) + \frac{1}{M \times N} \sum E \left[\sum_{i=1}^3 r_{i,x}^2 + \sum_{i=1}^3 r_{i,y}^2 \right]. \quad (12)$$

因为 $\sum E \left[\sum_{i=1}^3 r_{i,x}^2 + \sum_{i=1}^3 r_{i,y}^2 \right] \geq 0$,故 $E(P_C) \geq E(P_H)$.

同理,依据加性模型,对 $M \times N$ 彩色图像噪声图 $\sigma(x, y)$,计算信息嵌入后的横向噪声梯度:

$$\begin{aligned} \sigma'_{i,x} &= \sigma'_i(x, y) - \sigma'_i(x-1, y) = \\ &(\sigma_i(x, y) + z_i(n)) - (\sigma_i(x-1, y) + z_i(n-1)) = \\ &\sigma_{i,x} + \delta_{i,x}(n), \end{aligned} \quad (13)$$

其中, $z_i(n)$ 为信息嵌入引入的各通道噪声; $\delta_{i,x}(n)$ 为相邻噪声系数的横向差值.

计算信息嵌入后的纵向噪声梯度:

$$\sigma'_{i,y} = \sigma_{i,y} + \delta_{i,y}(n), \quad (14)$$

其中, $\delta_{i,y}(n)$ 为相邻噪声系数的纵向差值.

记非掩密和掩密彩色图像噪声图的噪声梯度和序列为 J_H 和 J_C ,那么:

J_H 的均值为

$$E(J_H) = \frac{1}{M \times N} \sum E \left[\sum_{i=1}^3 \sigma_{i,x}^2 + \sum_{i=1}^3 \sigma_{i,y}^2 \right]. \quad (15)$$

J_C 的均值为

$$E(J_C) = \frac{1}{M \times N} \sum E \left[\sum_{i=1}^3 (\sigma'_{i,x})^2 + \sum_{i=1}^3 (\sigma'_{i,y})^2 \right] = \frac{1}{M \times N} \sum E \left[\sum_{i=1}^3 (\sigma_{i,x} + \delta_{i,x}(n))^2 + \sum_{i=1}^3 (\sigma_{i,y} + \delta_{i,y}(n))^2 \right]. \quad (16)$$

因为 $\sigma_i(x, y)$ 与 $z_i(x, y)$ 独立分布,均近似服从均匀分布或高斯分布,因此,不失一般性, $\sigma_{i,x}$ 与 $\delta_{i,x}(n)$ 统计独立, $\sigma_{i,y}$ 与 $\delta_{i,y}(n)$ 统计独立,即 $E(\sigma_{i,x} \times \delta_{i,x}(n)) = E(\sigma_{i,x}) \times E(\delta_{i,x}(n))$, $E(\sigma_{i,y} \times \delta_{i,y}(n)) = E(\sigma_{i,y}) \times E(\delta_{i,y}(n))$,且 $E(\sigma_{i,x}) = E(\sigma_{i,y}) = 0$,因此,式(16)可以写为

$$E(J_C) = E(J_H) + \frac{1}{M \times N} \sum E \left[\sum_{i=1}^3 \delta_{i,x}^2 + \sum_{i=1}^3 \delta_{i,y}^2 \right]. \quad (17)$$

因为 $E \left[\sum_{i=1}^3 \delta_{i,x}^2 + \sum_{i=1}^3 \delta_{i,y}^2 \right] \geq 0$,故 $E(J_C) \geq E(J_H)$.

由以上分析,对于彩色图像,掩密图像的颜色梯度和序列均值大于或等于非掩密图像的颜色梯度和序列均值,说明颜色梯度和序列的震荡特性在隐写前后有差异;同时,针对彩色图像小波子带噪声图,掩密图像的噪声梯度和序列均值大于或等于非掩密图像的噪声梯度和序列均值,说明噪声梯度和序列的震荡特性在隐写前后有差异,因此颜色梯度和序列及噪声梯度和序列可用于彩色图像的隐写分析.

记非掩密和掩密彩色图像的2阶颜色梯度方向序列为 $Q_{i,H}^2, Q_{i,C}^2 (i \in [1, 3])$,则:

$Q_{i,H}^2$ 的均值为

$$E(Q_{i,H}^2) = \frac{1}{M \times N} \sum E \left[(u_{i,x} u_{(i+1) \bmod 3, y} - u_{(i+1) \bmod 3, x} u_{i,y})^2 \right]. \quad (18)$$

$Q_{i,C}^2$ 的均值为

$$E(Q_{i,C}^2) = \frac{1}{M \times N} \sum E \left[(u'_{i,x} u'_{(i+1) \bmod 3, y} - u'_{(i+1) \bmod 3, x} u'_{i,y})^2 \right]. \quad (19)$$

将 $u'_{i,x} = u_{i,x} + r_{i,x}(n)$ 和 $u'_{i,y} = u_{i,y} + r_{i,y}(n)$ 代入式(19),化简后得到:

$$\begin{aligned} E(Q_{i,C}^2) &= E(Q_{i,H}^2) + \\ &\frac{1}{M \times N} \sum E \left((r_{i,x} r_{(i+1) \bmod 3, y})^2 + (r_{i,y} r_{(i+1) \bmod 3, x})^2 + (r_{i,x} u_{(i+1) \bmod 3, y})^2 + (r_{i,y} u_{(i+1) \bmod 3, x})^2 + (u_{i,x} r_{(i+1) \bmod 3, y})^2 + (u_{i,y} r_{(i+1) \bmod 3, x})^2 \right). \end{aligned} \quad (20)$$

故 $E(Q_{i,C}^2) \geq E(Q_{i,H}^2) (i \in [1, 3])$,即掩密图像的2阶颜色梯度方向序列均值分别大于或等于非掩密图像的2阶颜色梯度方向序列均值.

同理,记非掩密和掩密彩色图像噪声图的噪声梯度方向序列为 $K_{i,H}^2, K_{i,C}^2 (i \in [1, 3])$, 则:

$K_{i,H}^2$ 的均值为

$$E(K_{i,H}^2) = \frac{1}{M \times N} \sum E[(\sigma_{i,x} \sigma_{(i+1) \bmod 3,y} - \sigma_{(i+1) \bmod 3,x} \sigma_{i,y})^2]. \quad (21)$$

$K_{i,C}^2$ 的均值为

$$E(K_{i,C}^2) = \frac{1}{M \times N} \sum E[(\sigma'_{i,x} \sigma'_{(i+1) \bmod 3,y} - \sigma'_{(i+1) \bmod 3,x} \sigma'_{i,y})^2]. \quad (22)$$

将 $\sigma'_{i,x} = \sigma_{i,x} + \delta_{i,x}(n)$ 和 $\sigma'_{i,y} = \sigma_{i,y} + \delta_{i,y}(n)$ 代入式(22), 化简后得到:

$$E(K_{i,C}^2) = E(K_{i,H}^2) +$$

$$\frac{1}{M \times N} \sum E[(\delta_{i,x} \delta_{(i+1) \bmod 3,y})^2 + (\delta_{i,y} \delta_{(i+1) \bmod 3,x})^2 + (\delta_{i,x} \sigma_{(i+1) \bmod 3,y})^2 + (\delta_{i,y} \sigma_{(i+1) \bmod 3,x})^2 + (\sigma_{i,x} \delta_{(i+1) \bmod 3,y})^2 + (\sigma_{i,y} \delta_{(i+1) \bmod 3,x})^2]. \quad (23)$$

故 $E(K_{i,C}^2) \geq E(K_{i,H}^2) (i \in [1, 3])$, 即掩密图像的 2 阶噪声梯度方向序列均值分别大于等于非掩密图像的 2 阶噪声梯度方向序列均值。

因此, 针对彩色图像, 掩密图像的 2 阶颜色梯度方向序列均值大于或等于非掩密图像的 2 阶颜色梯度方向序列均值, 说明颜色梯度方向序列的震荡特性在隐写前后有着差异; 针对彩色图像噪声图, 掩密图像的 2 阶噪声梯度方向序列均值大于或等于非掩密图像的 2 阶噪声梯度方向序列均值, 说明噪声梯度方向序列的震荡特性在隐写前后有着差异, 因此颜色梯度方向序列及噪声梯度方向序列可用于彩色图像的隐写分析。

4.2.2 变换域隐写对序列 $P, J, Q, K_r^r (r=2)$ 的影响

彩色图像的变换域隐写一般在亮度通道的变换系数上嵌入信息, 即将 R, G, B 彩色图像转化为 YUV 或 YIQ 图像并在 Y 通道的变换系数上嵌入信息, 然后通过反变换恢复嵌入信息后的彩色图像。根据颜色模型的转换关系, Y 通道与 R, G, B 的关系为 $Y = 0.299R + 0.587G + 0.114B$, 因此, 变换域隐写过程引入的嵌入量对 Y 通道产生的变化, 将会通过 $a = 0.299, b = 0.587, c = 0.114$ 三个系数作用到 R, G, B 三颜色通道。根据式(12)(20), R, G, B 颜色的变化会引起彩色图像颜色梯度和序列和颜色梯度方向序列的震荡特性产生变化; 根据式(17)(23), 信息嵌入会引起彩色图像噪声图的噪声梯度和序列和噪声梯度方向序列的震荡特性产生变化, 因此, 通过检测彩

色图像的颜色梯度和序列和颜色梯度方向序列的震荡特征, 以及彩色图像噪声图的噪声梯度和序列和噪声梯度方向序列的震荡特征, 可实现对变换域彩色图像的隐写分析。

4.3 特征序列的 HHT 变换

为了提取上述各序列在隐写前后序列的震荡特性差异, 本文引入 Hilbert-Huang 变换^[18] (HHT), 作为提取震荡特性差异的方法。

HHT 变换是一种两步骤信号处理方法: 经验模式分解(EMD)和 Hilbert 谱分析。首先用经验模式分解方法获得有限数目的固有模态函数 IMF, 然后再利用 Hilbert 变换和瞬时频率方法获得信号的时-频谱, 即 Hilbert 谱。

EMD 依照从高到低的顺序, 将非平稳序列分解为数目有限的几个 IMF, 这些 IMF 刻画了随机序列在每一局部的震荡结构或频率结构, 而且在同一时间局部, 先提取的 IMF 频率一定高于后提取的 IMF 频率。因此, EMD 分解能够很好地按顺序提取各个局部从高到低的频率结构, 具体的 HHT 变换方法见文献[18]。

对非掩密和掩密彩色图像的颜色梯度和序列 P_H 和 P_C 进行 EMD 分解, 得到非掩密颜色梯度和序列的第 k 个 IMF 为 $f_k^{P_H}(t)$ 和掩密颜色梯度和序列的第 k 个 IMF 为 $f_k^{P_C}(t)$ 。 P_C 与 P_H 相比, 震荡较为剧烈, 因此经 EMD 分解后提取的高频能量 $f_k^{P_C}(t)$ 将高于 $f_k^{P_H}(t)$ 。同理, 掩密后的 2 阶颜色梯度方向序列 $Q_{i,C}^2$ 较掩密前 $Q_{i,H}^2$ 震荡剧烈, 经 EMD 分解后提取的高频能量 $f_k^{Q_{i,C}^2}(t)$ 将高于 $f_k^{Q_{i,H}^2}(t)$ 。

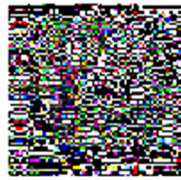
对非掩密和掩密彩色图像小波子带噪声图的噪声梯度和序列 J_H 和 J_C 进行 EMD 分解, 得到非掩密噪声梯度和序列的第 k 个 IMF 为 $f_k^{J_H}(t)$ 和掩密噪声梯度和序列的第 k 个 IMF 为 $f_k^{J_C}(t)$ 。 J_C 与 J_H 相比, 震荡较为剧烈, 因此经 EMD 分解后提取的高频能量 $f_k^{J_C}(t)$ 将高于 $f_k^{J_H}(t)$ 。同理, 掩密后的彩色图像噪声图的 2 阶噪声梯度方向序列 $K_{i,C}^2$ 较掩密前 $K_{i,H}^2$ 震荡剧烈, 经 EMD 分解后提取的高频能量 $f_k^{K_{i,C}^2}(t)$ 将高于 $f_k^{K_{i,H}^2}(t)$ 。

图 1 为 131×131 的原始图像 pepper; 图 2 为其第 1 级水平、垂直和对角方向小波子带噪声图; 图 3 为随机调制隐写以 0.1bpp(bits per pixel) 随机嵌入信息后的隐写图; 图 4 为隐写图第 1 级水平、垂直和对角方向小波子带噪声图。

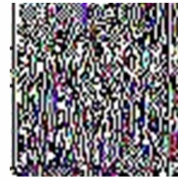


Fig. 1 Original image pepper.

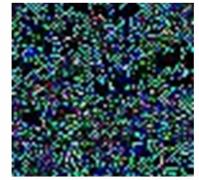
图 1 原始图像 pepper



(a) Horizontal subband



(b) Vertical subband



(c) Diagonal subband

Fig. 2 First level wavelet subbands noise image of the original image.

图 2 原始图像第 1 级小波子带噪声图

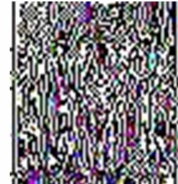


Fig. 3 Stego image pepper.

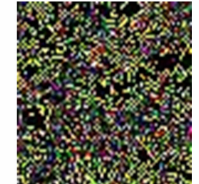
图 3 含密图像 pepper



(a) Horizontal subband



(b) Vertical subband

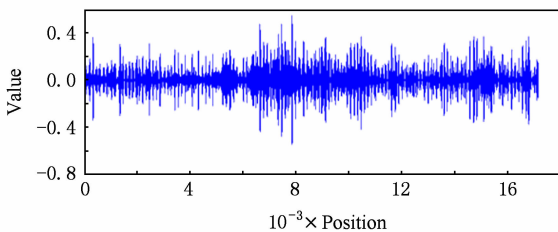


(c) Diagonal subband

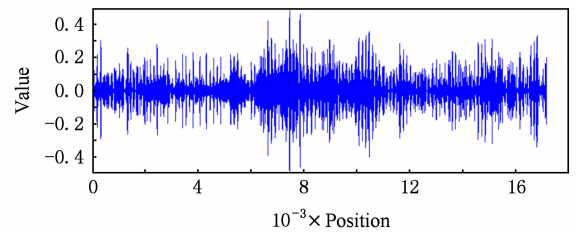
Fig. 4 First level wavelet subbands noise image of the stego image.

图 4 含密图像第 1 级小波子带噪声图

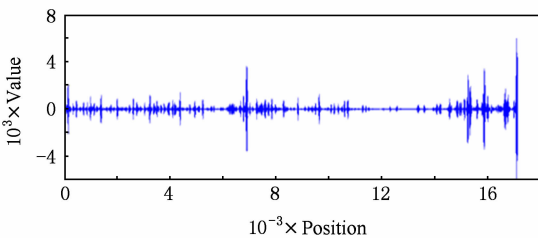
图 5(a)(b)为原始图像 pepper 的颜色梯度和序列与 R-G 梯度方向序列经 EMD 分解得到的第 1 个 IMF,图 6(a)(b)分别为用随机调制隐写以 0.1bpp 嵌入信息后的颜色梯度和序列与 R-G 颜色梯度方向序列进行 EMD 分解得到的 1 级 IMF. 比较图 5 和图 6 的 IMF 序列的数值, P_C 比 P_H 的 1 级 IMF 有较大的振荡幅度, $Q_{i,C}^2$ 比 $Q_{i,H}^2$ (R-G 通道) 的 1 级 IMF 有较大的振荡幅度.



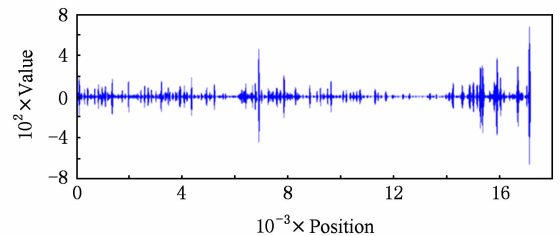
(a) The first IMF of color gradient sum sequence



(a) The first IMF of color gradient sum sequence



(b) The first IMF of color gradient orientation sequence of R-G channel



(b) The first IMF of color gradient orientation sequence of R-G channel

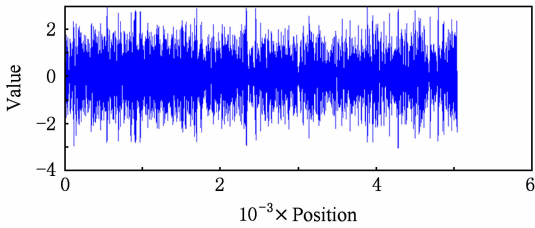
Fig. 6 The first IMF of color sequences of the stego image.

图 6 隐写图像的颜色序列 1 级 IMF 序列

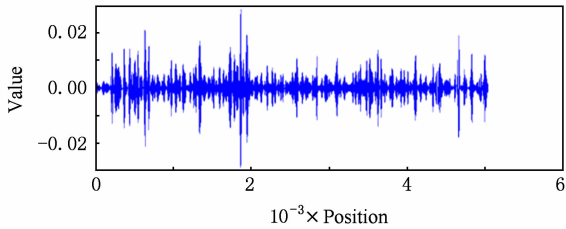
Fig. 5 The first IMF of color sequences of the original image.

图 5 原始图像 pepper 的颜色序列 1 级 IMF 序列

图 7(a)(b)为测试图像 pepper 第 1 级水平小波子带噪声图的噪声梯度和序列与 R-G 噪声梯度方向序列经 EMD 分解得到的第 1 个 IMF,图 8(a)(b)分别为用随机调制隐写以 0.1bpp 嵌入信息后的第 1 级水平小波子带噪声图的噪声梯度和序列与 R-G 噪声梯度方向序列进行 EMD 分解得到的 1 级 IMF. 比较图 7 和图 8 的 IMF 序列的数值, J_C 比 J_H 的 1 级 IMF 有较大的振荡幅度, $K_{i,C}^2$ 比 $K_{i,H}^2$ (R-G 通道) 的 1 级 IMF 有较大的振荡幅度.

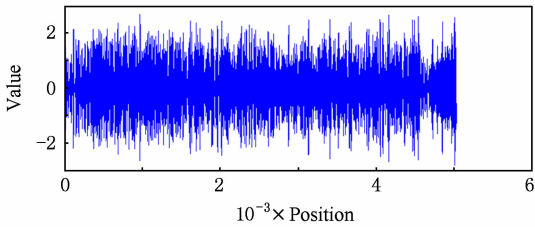


(a) The first IMF of color gradient sum sequence

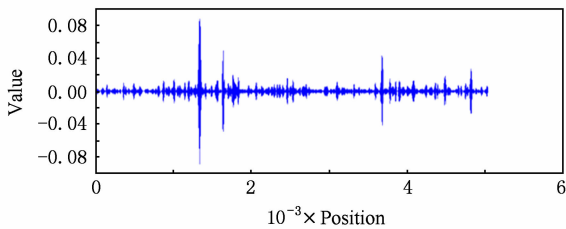


(b) The first IMF of color gradient orientation sequence of R-G channel

Fig. 7 The first IMF of first level horizontal wavelet subband noise sequence of the original image.
图7 原始图像 pepper 的第1级水平小波子带噪声序列1级 IMF 序列



(a) The first IMF of color gradient sum sequence



(b) The first IMF of color gradient orientation sequence of R-G channel

Fig. 8 The first IMF of first level horizontal wavelet subband noise sequence of the stego image.
图8 隐写图像的的第1级水平小波子带噪声序列1级 IMF 序列

4.4 基于 EMD 及支持向量机 (SVM) 的隐写分析算法

本文对待检测彩色图像进行3级小波分解,对9个高频系数子带滤波得到的9个小波噪声图分别提取噪声梯度和序列及噪声梯度方向序列,得到36维特征,结合待测彩色图像的颜色梯度和序列及颜色梯度方向序列等4维特征,共40维特征,联合为

特征向量用于隐写分析。

记 $M \times N$ 待检测彩色图像 $m_{M \times N}$ 的颜色梯度和序列为 P , 颜色梯度方向序列为 $Q_i^2 (i \in [1, 3])$, 其9个小波子带噪声图的噪声梯度和序列为 $J_l (l \in [1, 9])$, 噪声梯度方向序列为 $K_{i,l}^2 (i \in [1, 3], l \in [1, 9])$. 由于不同的彩色图像内容和色彩变化差异大, 因此在预处理操作中, 对 $P, Q_i^2 (i \in [1, 3]), J_l (l \in [1, 9]), K_{i,l}^2 (i \in [1, 3], l \in [1, 9])$ 中的元素分别以 z -score 方法进行归一化处理。

对归一化后的 $P, Q_i^2 (i \in [1, 3]), J_l (l \in [1, 9]), K_{i,l}^2 (i \in [1, 3], l \in [1, 9])$ 进行 EMD 分解, 对各自的第1个 IMF 经 Hilbert 变换后生成的 Hilbert 谱中的元素求幅值的均值, 称为对应 IMF 的特征, 以40维特征组成的向量 $(P_{\text{imf}}, Q_{i,\text{imf}}^2 (i \in [1, 3]), J_{l,\text{imf}} (l \in [1, 9]), K_{i,l,\text{imf}}^2 (i \in [1, 3], l \in [1, 9]))$ 作为待测彩色图像的特征向量, 以支持向量机 (SVM) 为分类器, 进行隐写分析。

算法1. 彩色图像隐写分析算法。

输入: 待检测 $M \times N$ 彩色图像 $m_{M \times N}$;

输出: 分析结果 $output = +1$, 则为掩密彩色图像; 分析结果 $output = -1$, 则为非掩密彩色图像。

1) 对 $m_{M \times N}$ 进行3级小波分解, 应用反向小波阈值收缩滤波去噪法, 得到 $m_{M \times N}$ 的9个高频系数子带小波噪声图 $\sigma_l (l \in [1, 9])$ 。

2) 对 $m_{M \times N}$ 求其2阶颜色梯度方向序列 $Q_i^2 (i \in [1, 3])$ 及颜色梯度和序列 P 。

3) 对 $\sigma_l (l \in [1, 9])$ 求其2阶噪声梯度方向序列 $K_{i,l}^2 (i \in [1, 3], l \in [1, 9])$ 及噪声梯度和序列 $J_l (l \in [1, 9])$ 。

4) 求 Q_i^2 序列的均值 $E(Q_i^2)$ 和方差 $\sigma(Q_i^2) (i \in [1, 3])$, 求 P 序列的均值 $E(P)$ 和方差 $\sigma(P)$, 求 $K_{i,l}^2$ 序列的均值 $E(K_{i,l}^2)$ 和方差 $\sigma(K_{i,l}^2) (i \in [1, 3], l \in [1, 9])$, 求 J_l 序列的均值 $E(J_l)$ 和方差 $\sigma(J_l) (l \in [1, 9])$ 。

5) 归一化预处理, $Q_{i,\text{std}}^2 = (Q_i^2 - E(Q_i^2)) / \sigma(Q_i^2)$, $P_{\text{std}} = (P - E(P)) / \sigma(P)$, $K_{i,l,\text{std}}^2 = (K_{i,l}^2 - E(K_{i,l}^2)) / \sigma(K_{i,l}^2)$, $J_{l,\text{std}} = (J_l - E(J_l)) / \sigma(J_l)$ 。

6) 对 $Q_{i,\text{std}}^2, P_{\text{std}}, K_{i,l,\text{std}}^2, J_{l,\text{std}}$ 进行 EMD 分解, 得到各自的第1个 IMF 序列, 应用 HHT 变换计算特征向量 $(P_{\text{imf}}, Q_{i,\text{imf}}^2 (i \in [1, 3]), J_{l,\text{imf}} (l \in [1, 9]), K_{i,l,\text{imf}}^2 (i \in [1, 3], l \in [1, 9]))$ 。

7) 用训练后的 SVM 作为分类器进行分类判别。如分析结果 $output = +1$, 则为掩密彩色图像; 分析结果 $output = -1$, 则为非掩密彩色图像。

5 实验结果与分析

5.1 实验测试样本

为了验证本文算法的性能,实验中使用的原始图像来自于 UCID 图像库^[19] 以及一些标准图像共 2 000 幅,其中空域(BMP 格式)彩色图像 1 000 幅,DCT 域(JPG 格式)彩色图像 1 000 幅,图像类型包括风景、人物肖像和建筑等.实验时,所有 BMP 格

式彩色图像统一剪切为 256×256 ,所有 JPG 格式彩色图像经过剪切并用 80% 的质量因子压缩为 256×256 大小.

实验中,将文献[9]和文献[12]与本文算法进行了性能对比,结果如表 1 和表 2 所示.其中文献[9]算法将彩色图像转化为 YUV 空间后在亮度和色度分量上进行检测,构造了 49 个分类特征向量;文献[12]算法在分别在彩色图像的 RGB 通道提取纹理特征和虚特征值等特征,构造了 150 维的分类特征向量.

Table 1 Steganalysis Results of BMP Color Images

表 1 BMP 格式彩色图像的检测结果

%

Method (Embedding Rate/bpp)	Ref[9]			Ref[12]			Our Method		
	TP	FP	AR	TP	FP	AR	TP	FP	AR
SLSB(0.05)	63.8	33.5	65.2	70.6	30.7	70.0	78.3	25.5	76.4
SLSB(0.1)	74.4	25.7	74.4	79.4	22.1	78.7	83.4	19.3	82.1
SLSB(0.2)	79.7	18.1	80.8	84.8	15.2	84.8	87.3	12.5	87.4
SLSB(0.4)	86.3	14.2	86.1	88.3	11.5	88.4	89.9	8.2	90.9
SM(0.05)	68.7	34.4	67.2	71.4	29.1	71.2	75.5	27.4	74.1
SM(0.1)	74.4	27.5	73.5	80.9	23.9	78.5	80.4	22.7	78.9
SM(0.2)	82.3	17.5	82.4	84.2	16.8	83.7	83.9	14.1	84.9
SM(0.4)	85.9	12.8	86.6	88.1	12.2	88.2	88.7	10.6	89.1
Average	76.9	23.0	77.0	81.0	20.2	80.4	83.4	17.5	82.9

Table 2 Steganalysis Results of JPG Color Images

表 2 JPG 格式彩色图像的检测结果

%

Method	Embedding Rate	Ref[9]			Ref[12]			Our Method		
		TP	FP	AR	TP	FP	AR	TP	FP	AR
Jsteg	10×10	64.1	36.9	63.6	66.7	31.5	67.6	66.2	26.6	69.8
	20×20	70.4	32.2	69.1	73.2	29.6	71.8	75.4	20.8	77.3
	40×40	80.1	23.4	78.4	80.4	24.8	77.8	84.6	18.1	83.3
	80×80	84.8	12.4	86.2	88.1	14.7	86.7	88.9	9.6	89.7
F5	10×10	63.5	32.1	65.7	64.2	28.8	67.7	71.2	24.6	73.3
	20×20	73.1	26.5	73.3	71.2	21.6	74.8	78.7	16.1	81.3
	40×40	82.4	19.2	81.6	80.9	14.7	83.1	82.2	13.6	84.3
	80×80	84.9	12.3	86.3	85.7	10.1	87.8	87.1	8.3	89.4
OutGuess0.2	10×10	60.4	34.0	63.2	62.7	35.3	63.7	69.1	29.5	69.8
	20×20	76.5	27.1	74.7	75.4	27.0	74.2	76.7	24.3	76.2
	40×40	79.7	15.3	82.2	81.1	16.7	82.2	82.5	13.7	84.4
	80×80	U	U	U	U	U	U	U	U	U
StegHide	10×10	61.3	32.9	64.2	63.9	31.2	66.4	64.2	27.6	68.3
	20×20	70.9	25.5	72.7	71.6	26.8	72.4	76.5	20.1	78.2
	40×40	80.1	18.7	80.7	82.8	19.8	81.5	82.3	18.1	82.1
	80×80	86.5	10.3	88.1	87.3	11.7	87.8	88.9	8.9	90.0
MB1	10×10	58.3	39.5	59.4	62.1	34.1	64.0	62.2	30.7	65.8
	20×20	64.1	30.7	66.7	68.8	29.4	69.7	69.5	23.9	72.8
	40×40	71.4	23.2	74.1	75.5	24.5	75.5	75.4	21.3	77.1
	80×80	82.3	13.7	84.3	81.9	13.1	84.4	83.3	12.3	85.5
Average		69.7	23.3	73.2	71.2	22.3	74.5	73.2	18.4	77.4

实验针对不同格式的彩色图像,测试了7种隐写算法,分别为:

1) 针对 BMP 格式彩色图像,采用随机 LSB 隐写(SLSB)和随机调制隐写(SM)2种方法,随机选择 RGB 颜色通道中的一个通道嵌入信息,嵌入率分别为 0.05bpp,0.1bpp,0.2bpp,0.4bpp.

2) 针对 JPG 格式彩色图像,分别采用 Jsteg, F5, OutGuess0.2, Steghide 隐写,在 JPEG 彩色图像转化为 8b 的灰度图像(灰度值 = $0.299R + 0.587G + 0.114B$)上嵌入 $10 \times 10, 20 \times 20, 40 \times 40, 80 \times 80$ 像素大小的彩色图像(嵌入前转换为灰度图像)得到隐写图像;采用 MB1 隐写方法,嵌入最大容量 10% 的随机信息得到隐写图像.然后将隐写图像转存为 RGB 彩色图像.

实验中,采用 LibSvm 支持向量机作为分类器,分类器核函数选择 RBF(radial basis function),其他参数均选用默认值(需要说明的是,SVM 支持向量机核函数类型以及训练参数的选择对分类性能有一定的影响,但 SVM 分类性能的优化问题属于机器学习的研究领域,不在本文的研究范围).在 1000 幅 BMP 彩色图像和 1000 幅 JPG 彩色图像中各随机选取 800 幅作为训练样本,分别用上述隐写方法嵌入信息后用于训练,剩下各 200 幅作为测试样本,用于测试.

5.2 性能分析与比较

表 1 为 BMP 彩色图像的检测结果,分别为 3 种检测算法对 2 种空域隐写在 4 种嵌入率下的真阳性率(TP)和假阳性率(FP),以及准确率(AR).

表 2 为 JPG 彩色图像的检测结果,分别为 3 种检测算法对 5 种变换域隐写在 4 种嵌入率下的真阳性率(TP)和假阳性率(FP),以及准确率(AR).

分析表 1 和表 2 的数据,可以得出以下结论:

1) 对比表 1 和表 2,本文算法对空域和变换域隐写的检测准确率平均值分别为 82.9% 和 77.4%,高于文献[9]的 77.0% 和 73.2%,也高于文献[12]的 80.4% 和 74.5%.而且,在低嵌入率的情况下,本文算法假阳性率(最高为 30.7%)远远低于文献[9]的假阳性率(最高达 39.5%)和文献[12]的假阳性率(最高达 35.3%),说明本文算法在低嵌入率下仍然有效,而文献[9]在低嵌入率下已失效.分析其原因在于:文献[9]在彩色图像转换后的 YUV 空间检测,而文献[12]则简单的分别在 R,G,B 三个颜色通道检测,因而不可避免的弱化或丢失了彩色图像 3 颜色通道相关性的信息,导致检测率较低、假阳性

率较高;而本文算法则在空域提取彩色图像颜色梯度和序列与颜色梯度方向序列,结合小波域提取的高频子带滤波后的噪声梯度和序列与噪声梯度方向序列,通过随机序列分析方法构造的特征向量可以准确地刻画隐写前后彩色图像通道相关性信息,因而检测率高于其他 2 种方法,同时假阳性率低于其他 2 种方法.

2) 对比表 1 和表 2,本文算法对彩色图像变化域隐写的检测率低于空域隐写方法,说明本文方法对不同隐写方法的敏感度也是不一样的,分析其原因在于:空域隐写直接在 RGB 的颜色通道上嵌入信息,使信息隐藏后相邻像素的颜色梯度变化较大;而变换域隐写在灰度值或亮度值上隐藏信息,掩密 JPEG 图像经转存为 RGB 图像后,亮度值的变化经 $Y = 0.299R + 0.587G + 0.114B$ 分解到 R,G,B 三颜色通道,使 R,G,B 颜色的相关性变化程度减小,弱化了隐写嵌入而引起相邻像素的颜色梯度变化程度,同时弱化了小波域高频子带滤波后的噪声梯度变化程度,因此,变换域隐写的分类检测准确率有所降低.

3) 从表 1 和表 2 可以看出,3 种算法的真阳性率(TP)都随着隐藏信息量的增加而呈递增趋势,而且假阳性率(FP)都随着隐藏信息量的增加而呈递减趋势.而本文提出的基于噪声模型的隐写分析方法,由于引入小波域高频子带滤波后的噪声特征,能有效地过滤图像内容对检测算法性能的影响,因此本文的方法具有更好的检测准确率和稳定性.

4) 本文算法将隐写信号作为加性噪声处理,如果图像本身也存在噪声(即含噪图像),则算法在一定程度上无法区分隐写图像和含噪图像,会将含噪图像误判为隐写图像,导致隐写检测性能降低.实验中,在 JPG 格式的测试样本中添加均值为 0、方差为 0.01 的高斯白噪声,生成含噪图像,与 F5 隐写图像混合,检测结果如表 3 所示:

Table 3 Steganalysis Results of JPG Color Images

表 3 JPG 格式彩色图像的检测结果

Method	Embedding Rate	Our Method/%		
		TP	FP	AR
F5	10×10	60.3	44.1	58.1
	20×20	66.9	35.6	65.7
	40×40	75.2	23.1	76.1
	80×80	80.1	14.2	82.9

与表 2 对比,可见随着隐写嵌入量的减少,检测

的真阳性率(TP)下降较大(最大达到 10.9%)、假阳性率(FP)上升较大(最大达到 19.5%),说明在小嵌入量的情况下,算法对噪声和隐写嵌入的区分性能较低.

5) 算法时间耗费. 在配置为 Intel Pentium Dual-Core 2 GHz 处理器,2 GB 内存的 PC 机上,matlab12.0 环境下,针对 BMP 和 JPG 格式各 200 幅测试样本的平均检测时间如表 4 所示:

Table 4 Comparison of Steganalysis Time
表 4 检测时间比较

Method	Eigenvector	Average Time/s
Ref [9]	49	6.846
Ref [12]	150	13.587
Our Method	40	9.683

从表 4 可知,本文算法所用平均检测时间为 9.683 s/幅,低于文献[12]的 13.587 s/幅,稍高于文献[9]的 6.846 s/幅. 分析原因,文献[12]所用特征向量为 150 维,提取特征向量耗时以及 SVM 分类耗时最多,导致平均检测时间最长;虽然本文算法所用特征向量维数最少,所用分类时间较短,但是在提取特征向量时,HHT 变换运算量较大,所用计算时间较长,导致平均检测时间大于文献[9].

6 结 论

本文深入分析了彩色图像颜色梯度特性以及彩色图像高频小波子带噪声图的噪声梯度特性,提出了一种基于噪声模型和通道融合的彩色图像隐写分析方法,并给出了实验结果. 算法基于通道融合的特性,分别提取彩色图像的颜色梯度特性以及彩色图像高频小波子带噪声图的噪声梯度特性,联合用于捕捉彩色图像在信息嵌入前后发生的变化;再者,算法引入小波高频子带噪声特征,能有效地降低了图像内容对检测算法性能的影响,使算法更具稳定性. 实验证明本文提出的算法能以平均 80.2%的准确率识别彩色隐写图像,是一种比较有效的彩色图像通用隐写检测算法.

参 考 文 献

[1] Luo Xiangyang, Lu Peizhong, Liu Fenlin. A dynamic compensation LSB steganography method defeating SPA [J]. Chinese Journal of Computers, 2007, 30(3): 463-473 (in Chinese)

(罗向阳, 陆佩忠, 刘粉林. 一类可以抵御 SPA 分析的动态补偿 LSB 信息隐藏方法[J]. 计算机学报, 2007, 30(3): 463-473)

[2] Fridrich J, Goljan M. Digital image steganography using stochastic modulation [C] //Proc of SPIE Electronic Imaging, Bellingham WA; SPIE Press, 2003: 191-203

[3] Sarkar A, Solanki K, Manjun B S. Further study on YASS: Steganography based on randomized embedding to resist blind steganalysis [C] //Proc of the SPIE Security, Steganography, and Watermarking of Multimedia Contents X. Bellingham WA; SPIE Press, 2008: 16-31

[4] Gao H Y, Xu Y, Li X, et al. A steganographic algorithm for JPEG2000 image [C] //Proc of Computer Science and Software Engineering. Piscataway, NJ: IEEE, 2008: 1263-1266

[5] Lee K, Jung C H, Lee S J, et al. Color cube analysis for detection of LSB steganography in RGB color images [G] //LNCS 3481; Proc of ICCSA 2005. Berlin: Springer, 2005: 537-546

[6] Kong X W, Liu W F, You X G. Secret message location steganalysis based on local coherences of Hue [G]//LNCS 3768; Proc of PCM 2005. Berlin: Springer, 2005: 301-311

[7] Chen Ming, Zhang Ru, Liu Fanfan, et al. Steganalysis of LSB matching based on regional correlation [J]. Journal of Communications, 2010, 31(3): 1-11 (in Chinese)
(陈铭, 张茹, 刘凡凡, 等. 基于区域相关性的 LSB 匹配隐写分析[J]. 通信学报, 2010, 31(3): 1-11)

[8] Huang Fangjun, Huang Jiwu. Universal steganalysis of JPEG images based on image calibration [J]. Science in China: Series F Information Sciences, 2009, 39(4): 383-390 (in Chinese)
(黄方军, 黄继武. 基于图像校准的 JPEG 图像通用型隐写分析[J]. 中国科学 F 辑: 信息科学, 2009, 39(4): 383-390.)

[9] Chen Dan, Chen Yuan, Wang Yumin. A universal blind steganalysis for color images [J]. Journal of Electronic and Information Technology, 2005, 27(10): 1542-1549 (in Chinese)
(陈丹, 陈原, 王育民. 一种针对彩色图像的泛盲掩密分析方案[J]. 电子与信息学报, 2005, 27(10): 1542-1549)

[10] Mao Jiafa, Lin Jiajun, Dai Meng. An attacked image based hidden message blind detect technique [J]. Chinese Journal of Computers, 2009, 32(2): 318-327 (in Chinese)
(毛家发, 林家骏, 戴蒙. 基于图像攻击的隐藏信息盲检测技术[J]. 计算机学报, 2009, 32(2): 318-327)

[11] Sun Wenyu, Liu Tingting, Zhang Xinpeng, et al. Statistical features for universal steganalysis on color images [J]. Journal of Image and Graphics, 2008, 13(10): 1914-1917 (in Chinese)
(孙文颀, 刘婷婷, 张新鹏, 等. 彩色图像通用隐写分析的多类统计特征[J]. 中国图象图形学报, 2008, 13(10): 1914-1917)

- [12] Mao Jiafa, Lin Jiajun. A novel general steganalysis technique based on cover image describing [J]. Chinese Journal of Computers, 2010, 33(3): 569-579 (in Chinese)
(毛家发, 林家骏. 基于净图描述的通用隐写分析技术[J]. 计算机学报, 2010, 33(3): 569-579)
- [13] Donoho D L, Johnstone I M. Minimax estimation via wavelet shrinkage [J]. Annals of Statistics, 1998, 26(3): 879-921
- [14] Luo Xiangyang, Liu Fenlin, Yang Chunfang, et al. Detection of PS and stego images based on noise models and features integration [J]. Chinese Journal of Computers, 2010, 33(6): 1060-1072 (in Chinese)
(罗向阳, 刘粉林, 杨春芳, 等. 基于噪声模型和特征联合的PS图像与隐写图像检测[J]. 计算机学报, 2010, 33(6): 1060-1072)
- [15] Xiao Liang, Wu Huizhong, Wei Zhihui. Research on generalized Mumford-Shah model for color image restoration and edge detection [J]. Chinese Journal of Computers, 2006, 29(2): 286-295 (in Chinese)
(肖亮, 吴慧中, 韦志辉. 面向彩色图像恢复与边缘检测的Mumford-Shah推广模型研究[J]. 计算机学报, 2006, 29(2): 286-295)
- [16] Stephen J S, Robin E N H. The Color Image Processing Handbook [M]. London: Chapman & Hall, 1998: 67-92
- [17] Huang J G, Mumford D. Statistics of natural images and models [C] //Proc of the IEEE Int Conf on Computer Vision

and Pattern Recognition. Piscataway, NJ: IEEE, 1999: 1541-1547

- [18] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis [C] //Proc of the Royal Society of London, A454. London: Royal Society Publishing, 1998: 903-995
- [19] Schaefer G, Stich M. UCID—An uncompressed colour image database [R]. Nottingham: School of Computing and Mathematics, Nottingham Trent University, 2003



Qi Ke, born in 1972. Received his PhD degree in computer application from Hunan University. Associate professor. His main research interests include information security, hiding information detection, digital watermarking, and image processing.



Xie Dongqing, born in 1965. Professor and PhD supervisor of Guangzhou University. His main research interests include information security, information hiding, and cryptography(dxie@hnu.cn).