

Journal of Image  
and Graphics

# 中国图象图形学报



ISSN1006-8961  
CN11-3758/TB

2012 8  
Vol.17 No.

中国科学院遥感应用研究所  
中国图象图形学学会主办  
北京应用物理与计算数学研究所

# 中国图象图形学报

Zhongguo Tuxiang Tuxing Xuebao

2012年8月 第17卷 第8期(总第196期)

## 目次

### 综述

可计算图像美学研究进展 ..... 王伟凝, 蚁静斌, 贺前华(893)

### 图像处理和编码

利用混沌 PSO 或分解的 2 维 Tsallis 灰度熵阈值分割 ..... 吴一全, 吴诗嫻, 张晓杰(902)

H. 264 并行编码中负载均衡方法 ..... 侯兴松, 刘大齐, 盛凯, 赖玉洁(911)

提升细节捕捉能力的非下采样轮廓波变换 ..... 郭洪, 李雪军(919)

SVD 域的图像高斯噪声强度估计 ..... 柳薇(923)

图像扩散去噪模型的分析与改进 ..... 傅绪加, 刘峰, 王信松(934)

小波域最小嵌入失真函数设计及其在隐写中的应用 ..... 李军, 潘峰, 杨晓元, 刘镇(946)

### 图像分析和识别

抗压缩的照片图像与真实感计算机图形识别 ..... 张荣, 王让定(953)

云的自适应阈值检测方法 ..... 黄茜, 王少龙, 徐道磊, 廖婷婷(960)

煤矸区分中的间隔灰度压缩扩阶共生矩阵 ..... 于国防(966)

离群样本划分的半监督模糊学习策略 ..... 宋晓宁, 杨静宇, 杨习贝(971)

多相 Chan-Vese 模型的直接对偶方法 ..... 刘存良, 潘振宽, 郑永果, 王国栋, 丁洁玉(979)

利用梯度信息快速提取直线边缘特征 ..... 夏军营, 徐小泉, 熊九龙(987)

2 维双树复小波不确定度加权融合的人脸识别 ..... 王仕民,叶继华,邓涛,王明文(995)

### 图像理解和计算机视觉

流形学习与非线性回归结合的头面部姿态估计 ..... 范进富,陈锻生(1002)

### 计算机图形学

角点距离矩阵和同心圆划分的曲线描述与匹配 ..... 曾接贤,刘秀朋,符祥(1011)

弹性二次曲面模型下的 3 维形状表现与平滑 ..... 郝世杰,蒋建国,郭艳蓉,詹曙(1021)

### 医学图像处理

主动学习的白细胞图像自动分割 ..... 崔凤,潘晨,吴向平,徐军(1029)

### 遥感图像处理

Bregman 交替迭代遥感图像复原方法 ..... 徐焕宇,孙权森,罗楠,夏德深(1035)

基于各向异性 Markov 随机场的遥感影像亚像元尺度建筑物提取 ..... 李晓冬,凌峰,杜耘(1042)

## 中国图象图形学报

刊名题字: 宋 健

月刊(1996 年创刊)

第 17 卷 第 8 期

2012 年 8 月 16 日出版

**主管单位** 中国科学院

**主 办** 中国科学院遥感应用研究所  
中国图象图形学学会  
北京应用物理与计算数学研究所

**主 编** 李小文

**编辑出版** 《中国图象图形学报》编辑出版委员会  
北京 9718 信箱 邮编 100101  
电子信箱:jig@irsa.ac.cn  
电话:010-64807995 010-82614429  
网 址:www.cjig.cn

**印刷装订** 北京北林印刷厂

**广告经营许可证** 京朝工商广字第 0346 号

**总 发 行** 北京报刊发行局

**订 购** 全国各地邮局

**国外发行** 中国国际图书贸易总公司  
(中国国际书店)  
(北京 399 信箱 邮编 100044)

**Superintended by** Chinese Academy of Sciences

**Sponsored by** Institute of Remote Sensing Application,  
CAS China Society of Image and Graphics  
Institute of Applied Physics and Computational  
Mathematics

**Chief editor** LI Xiaowen

**Editor, Publisher** Editorial and Publishing Board  
of Journal of Image and Graphics  
(P. O. Box 9718, Beijing 100101, China)  
E-mail:jig@irsa.ac.cn

**Distributed by** Beijing Bureau for Distribution of Newspapers  
and Journals

**Domestic** All Local Post Offices in China

**Foreign** China International Book Trading Corporation  
(P. O. Box 399, Beijing 100044, China)

**Printed by** Beijing Beilin Printing House

ISSN 1006-8961 CN11-3758/TB CODE ZTTFXZ 国内邮发代号: 82-831 国外发行代号: M1406 国内定价: 45.00 元

# Journal of Image and Graphics

(Monthly, Started in 1996)

Vol. 17 No. 8 August 2012

## Contents

### Review

Review for computational image aesthetics ..... Wang Weining, Yi Jingjian, He Qianhua (893)

### Image Processing and Coding

Two-dimensional Tsallis gray entropy image thresholding using chaotic particle swarm optimization or decomposition  
..... Wu Yiquan, Wu Shihua, Zhang Xiaojie (902)

Load balancing for H. 264 parallel encoding ..... Hou Xingsong, Liu Daqi, Sheng Kai, Dun Yujie (911)

Non-subsampled contourlet transform algorithm to promote detail information capturing ability ..... Guo Hong, Li Xuejun (919)

Gaussian noise level estimation in SVD domain for images ..... Liu Wei (923)

Analysis and improvement of image diffusion denoising models ..... Fu Xujia, Liu Feng, Wang Xinsong (934)

Design of minimizing embedding impact function in DWT domain and its applications in steganography  
..... Li Jun, Pan Feng, Yang Xiaoyuan, Liu Zhen (946)

### Image Analysis and Recognition

Anti-compression approach to distinguishing photographic images and photorealistic computer graphics  
..... Zhang Rong, Wang Rangding (953)

Adaptive threshold approach for night-sky cloud inspection ..... Huang Qian, Wang Shaolong, Xu Daolei, Liao Tingting (960)

Expanded order co-occurrence matrix to differentiate between coal and gangue based on interval grayscale compression  
..... Yu Guofang (966)

Semi-supervised fuzzy learning strategy by using a way of partitioning the outlier instances  
..... Song Xiaoning, Yang Jingyu, Yang Xibei (971)

Direct dual method of Chan-Vese model for multiphase segmentation  
..... Liu Cunliang, Pan Zhenkuan, Zheng Yongguo, Wang Guodong, Ding Jieyu (979)

Fast line edge feature extraction using image gradients ..... Xia Junying, Xu Xiaoquan, Xiong Jiulong (987)

Two-dimensional dual-tree complex wavelet transform uncertainty weighted fusion in face recognition  
..... Wang Shimin, Ye Jihua, Deng Tao, Wang Mingwen (995)

### Image Understanding and Computer Vision

Combining manifold learning and nonlinear regression for head pose estimation ..... Fan Jinfu, Chen Duansheng (1002)

### Computer Graphics

Representation and matching for planar curve based on corner distance matrix and concentric circles  
..... Zeng Jiexian, Liu Xiupeng, Fu Xiang (1011)

Three-dimensional shape representation and smoothing with elastic quadratic patch model  
..... Hao Shijie, Jiang Jianguo, Guo Yanrong, Zhan Shu (1021)

### Medical Image Processing

White blood cell image segmentation based on active learning ..... Cui Feng, Pan Chen, Wu Xiangping, Xu Jun (1029)

### Remote Sensing Image Processing

Bregman alternating iterative method for remote sensing image restoration ..... Xu Huanyu, Sun Quansen, Luo Nan, Xia Deshen (1035)

Building extraction at the sub-pixel scale from remotely sensed images based on anisotropic Markov random field  
..... Li Xiaodong, Ling Feng, Du Yun (1042)

中图法分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2012)08-0946-07

论文引用格式: 李军, 潘峰, 杨晓元, 刘镇. 小波域最小嵌入失真函数设计及其在隐写中的应用[J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(8): 946-952.

# 小波域最小嵌入失真函数设计及其在隐写中的应用

李军<sup>1</sup>, 潘峰<sup>2,3</sup>, 杨晓元<sup>2,3</sup>, 刘镇<sup>1</sup>

1. 武警工程大学电子技术系网络与信息安全武警部队重点实验室, 西安 710086;
2. 西安电子科技大学网络信息安全教育部重点实验室, 西安 710071;
3. 武警工程大学网络与信息安全研究所, 西安 710086

**摘要:** 为了提高隐写方案的安全性, 提出一种基于最小嵌入失真原理和网格码的图像隐写算法。首先在离散小波域结合人眼视觉特性和整数提升小波变换设计了失真测度函数, 主要考虑了亮度、频率和纹理掩蔽因子对载体失真的影响。然后结合网格码设计了隐写算法, 将嵌入信息对载体的修改最小化并且集中在人眼不敏感区域。实验结果显示, 方案具有良好的视觉不可见性, 且能抵抗空域、小波域等隐写分析的攻击, 安全容量达到 0.4 bits/pixel。

**关键词:** 隐写; 最小嵌入失真; 网格码; 人眼视觉特性; 整数提升小波

## Design of minimizing embedding impact function in DWT domain and its applications in steganography

Li Jun<sup>1</sup>, Pan Feng<sup>2,3</sup>, Yang Xiaoyuan<sup>2,3</sup>, Liu Zhen<sup>1</sup>

1. Key Laboratory of Network & Information Security under the Chinese Armed Police Force, Electronic Department, Engineering University of the Armed Police Force, Xi'an 710086, China;
2. Key Laboratory of Network & Information Security of the Ministry of Education, Xidian University, Xi'an 710071, China;
3. Institution of Network & Information Security under Engineering University of the Armed Police Force, Xi'an 710086, China

**Abstract:** In order to improve the security of steganography system, an image steganography method based on Minimizing Embedding Impact and Syndrome-Trellis Codes is proposed. First, a distortion function in discrete wavelet transform (DWT) domain was designed according to human visual system and integer lifting wavelet transform, which is mainly concerned about the influences of frequency, luminance, and texture masking factor to the cover distortion. Then, the Syndrome-Trellis Codes are combined with the distortion function to propose the steganography method, to make sure that the embedding impact on the cover minimizing and centralizing is in the un-sensitivity domain. Experiments show that the proposed approach maintains a good visual quality of the stego-image and has a high security against steganalysis in space and wavelet domain. The security capacity can be about 0.4 bits/pixel.

**Key words:** steganography; minimizing embedding impact; Syndrome-Trellis codes (STCs); human visual system (HVS); integer lifting wavelet

## 0 引言

在隐密通信中, 发送者通过在隐写载体中嵌入

密信息从而与接收者达到隐密通信的目的, 隐写算法对载体的修改越少, 其安全性就相对越高。本文研究的是最小嵌入失真问题<sup>[1]</sup>。Filler 等人提出的网格码<sup>[2-4]</sup>可以接近理论上的仿真最优编码<sup>[5]</sup>,

收稿日期: 2011-09-19; 修回日期: 2012-03-03

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)基金项目(2007AA01Z429); 陕西省自然科学基金项目(2010JM8034); 武警工程大学基础基金项目(wjy201027)

第一作者简介: 李军(1987—), 男, 助教, 2012年于武警工程大学获密码学专业硕士学位, 主要研究方向为信息隐藏和密码学。E-mail: lijun9250lj@163.com

并且在空域和离散余弦变换域提出了失真测度函数,本文基于人眼视觉特性在离散小波变换域提出失真测度函数,结合网格码设计新的隐写方案。

### 1 最小嵌入失真

以数字图像载体为例,令载体和隐写后载体分别为  $X = (x_1, \dots, x_n), Y = (y_1, \dots, y_n) \in \{0, 1\}^n$ , 则嵌入过程所带来的失真可表示为

$$D(X, Y) = \|X - Y\|_p = \sum_{i=1}^n \rho_i |x_i - y_i| \quad (1)$$

式中,  $0 \leq \rho_i \leq \infty$  为将像素  $x_i$  修改为  $y_i$  所引起的失真,当  $\rho_i = \infty$  表示此像素不允许改变,即所谓的湿像素<sup>[6]</sup>。对于式(1)中的加性失真函数,文献[1]有下列分离定理:

令  $\rho = (\rho_i)_{i=1}^n, 0 \leq \rho_i \leq \infty$  为式(1)中的失真测度,若利用二进制嵌入操作在  $n$  个像素中嵌入  $m$  个秘密信息,则期望的最小失真形式为

$$D_{min} = (m, n, \rho) = \sum_{i=1}^n p_i \rho_i \quad (2)$$

$$p_i = \frac{e^{-\lambda \rho_i}}{1 + e^{-\lambda \rho_i}}$$

式中,  $p_i$  为修改第  $i$  个像素的概率,该分布为 Gibbs 分布的形式<sup>[5]</sup>,参数  $\lambda$  通过解嵌入容量方程式(3)获得。

$$-\sum_{i=1}^n (\rho_i \log \rho_i + (1 - \rho_i) \log_2(1 - \rho_i)) = m \quad (3)$$

上述分离定理的重要意义在于:在实际的隐写算法中,失真测度  $\rho$  和编码算法无关,只与图像内容和测度方法有关;更重要的是,上述定理给出了在已知失真测度的前提下,失真  $D$  达到最小的条件是修改第  $i$  个像素的概率  $\rho_i$  具有 Gibbs 分布的形式<sup>[5]</sup>,即仿真最优编码。基于上述考虑,设计一个合理的失真测度  $\rho$  是非常重要的。

### 2 接近仿真最优编码的网格码 STCs

上节中的仿真最优编码是假定像素的修改概率服从式(2)来达到的,而在实际中却很难做到。2010年,Filler, Judas 和 Fridrich 等人提出了接近仿真最优编码的网格码 STCs<sup>[2-4]</sup>,进而在此基础上构建实际的最小嵌入失真隐写算法。

#### 2.1 从卷积码到网格码

随着香农在 1959 年提出的保失真度准则下的

信源编码<sup>[7]</sup>以及维特比算法的出现<sup>[8-9]</sup>,卷积码成了第 1 个可以实现本文最小嵌入失真目的的编码,但是由于卷积码在实现时以线性反馈移位寄存器的方式进行,当嵌入容量  $\alpha = 1/k$  较小时,将需要  $k$  个寄存器,而维特比算法的复杂度与  $k$  成指数增长。Sidorenko 等人<sup>[10]</sup>指出最佳卷积码译码可以通过二进制的复杂度更低的网格码来实现,因此 Filler 等人选择了网格码作为最小嵌入失真的编码算法,而网格码本质上是一种卷积码。

#### 2.2 网格码结构

对秘密信息  $m$ 、原始载体  $x$  和隐写后的载体  $y$ , 嵌入过程可以表示为

$$y = Emb(x, m) = \arg \min_{Hy=m} D(x, y) \quad (4)$$

即在嵌入给定秘密信息的条件下失真  $D(x, y)$  达到最小。则提取秘密信息可以看成是解方程式(5)的过程。

$$m = Ext(y) = Hy \quad (5)$$

式中,  $H$  为校验矩阵,对于普通的矩阵,上述问题为 NP 困难问题,因此需要寻找具有特殊结构的  $H$ <sup>[3]</sup>。

在二进制域中,长度为  $n$  的网格码可以表示成式(5)的形式,解这个公式的过程称为维特比算法。一致校验矩阵  $H$  是通过将子矩阵  $\hat{H} \in \{0, 1\}^{h \times \omega}$  按照一定的规则排列得到,其中  $h$  是设计参数,决定了维特比算法的速度和效率(通常  $6 \leq h \leq 15$ );宽度  $\omega$  由嵌入容量  $\alpha$  决定:  $1/(\omega + 1) \leq \alpha \leq 1/\omega$ 。  $H$  与  $\hat{H}_{h \times \omega}$  的关系如图 1 所示,其中  $m$  为秘密信息的长度。

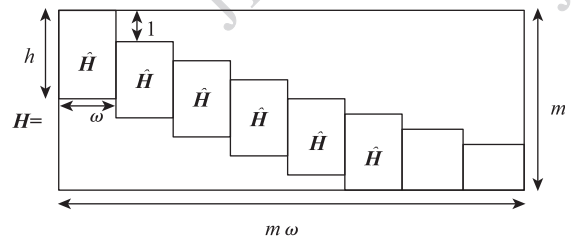


图 1  $H$  和  $\hat{H}_{h \times \omega}$  的结构

Fig. 1 Structure of  $H$  and  $\hat{H}_{h \times \omega}$

#### 2.3 网格码算法描述

与卷积码一样,每一个网格码的码字  $C = \{z \in \{0, 1\}^n | Hz = 0\}$  可以用网格图中的一个单独路径来表示,由于网格码与嵌入信息量  $m$  相关,因此网格码也可以表示为  $C(m) = \{z \in \{0, 1\}^n | Hz = m\}$ 。图 2 为网格码的一个例子,图 2(a)为所采用的子矩阵  $\hat{H}_{2 \times 2}$  和校验矩阵  $H$ ,图 2(b)为网格图,网格图中



式中,  $\eta$  为归一化参数,在建模时首先对数字图像进行  $16 \times 16$  分块,每个小块利用整数提升小波进行 3 层分解,得到系数  $I_r^\theta$ ,其中  $\theta = \{0,1,2,3\}$  代表水平、垂直、对角细节系数和低频近似系数, $r = \{1,2,3\}$  代表第  $r$  层, $i, j$  代表系数小块的横坐标和纵坐标。

### 3.2 亮度掩蔽因子

由于小波变换本身具有符合 HVS 的特点,因此低频近似系数  $I_3^3$  代表了该小块的亮度。Lewis 的模型<sup>[13]</sup>认为亮度越低人眼越敏感,这是不符合 HVS 特性的;Barni 的模型<sup>[14]</sup>虽然提出了人眼在低亮度和高亮度相对于中间亮度不敏感,但并未指出很亮区和很暗区之间的敏感性也有差异,事实上人眼对亮度的敏感成非线性,在高亮区敏感性低,而在很暗区域敏感性更低。考虑到计算复杂性,对于位深度为  $n$  的灰度图像,用下列两段线性函数近似代替非线性的亮度掩蔽因子

$$\Lambda(r, i, j) = \begin{cases} -2L(r, i, j) + 2 & L(r, i, j) \leq \frac{1}{2} \\ L(r, i, j) + \frac{1}{2} & L(r, i, j) > \frac{1}{2} \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $L(r, i, j) = \frac{1}{2^n} \times I_3^3(r, i, j) = \frac{1}{2^n} \times I_3^3\left(\left[\frac{i}{2^{3-r}}\right], \left[\frac{j}{2^{3-r}}\right]\right)$  为归一化的小波系数值, $I_3^3(r, i, j)$  为第 3 层低频小波系数,代表了图像块的亮度。由于并没有完全准确的亮度掩蔽因子模型可供参考,用拟合的曲线近似代替实际模型,图 3 为本文的模型与可能的实际模型的直观描述,两模型之间的差为可能存在的误差。

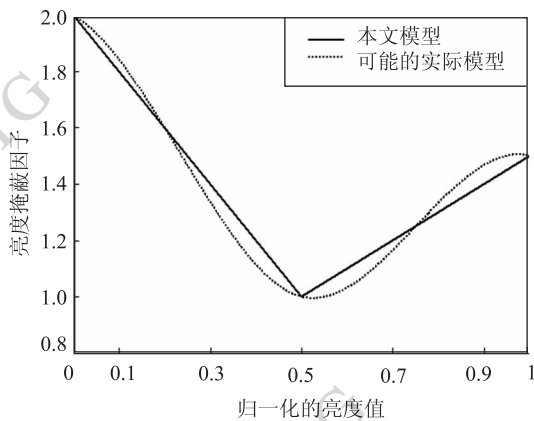


图 3 亮度掩蔽因子与亮度值的关系

Fig. 3 The relationship between luminance masking factors and luminance value

### 3.3 频率掩蔽因子

人眼对不同方向、不同层次的系数具有不同的敏感度,对对角高频系数敏感最低,对水平和垂直高频次之,对低频系数最敏感。文献[13-14]根据实验提出了频率掩蔽因子  $\Theta(r, \theta)$ ,由于本文只用到 3 层嵌入,因此将文献[14]中的频率掩蔽因子  $\Theta(r, \theta)$  修改为表 1 所示。由于小波分解各层尺度不同,因此频率掩蔽因子各层系数的不同反映了这种尺度对 JND 模型的影响。

表 1 频率掩蔽因子  $\Theta(r, \theta)$

层 $r$	方向 $\theta$		
	0 水平	1 垂直	2 对角
1	1	1	$\sqrt{2}$
2	0.32	0.32	$\sqrt{2} \times 0.32$
3	0.16	0.16	$\sqrt{2} \times 0.16$

### 3.4 纹理掩蔽因子

纹理掩蔽是 HVS 中重要的特性之一,人眼对平滑区域的噪声非常敏感,而对纹理较强区域则不敏感;图像的边缘信息对视觉也很重要,特别是边缘的位置信息,人眼很容易感觉到边缘的位置变化,而对于边缘的亮度误差并不敏感。文献[14]的纹理掩蔽因子为:

$$\Xi(r, i, j) = \sum_{k=0}^{3-r} \frac{1}{16^{k+1}} \times \sum_{\theta=0}^2 \sum_{x=0}^1 \sum_{y=0}^1 \left[ I_{k+r}^\theta \left( x + \left[ \frac{i}{2^k} \right], y + \left[ \frac{j}{2^k} \right] \right) \right]^2 \times \text{Var}\{I_3^3\} \quad (9)$$

它由两部分组成:第 1 部分为局部高频系数平方平均值,代表了边界特性,第 2 部分  $\text{Var}\{I_3^3\}$  为低频系数值的无偏估计方差,代表了纹理特性。两者计算的最小单位都是  $2 \times 2$  的小块。但是从理论上分析前一部分的平方运算有较大的计算复杂性,用高频系数绝对值的平均值代替,既可代表边界特性,也可以降低计算复杂性;而且由于本文方案最终计算出的失真测度是一种相对关系,因此纹理掩蔽因子的大小反映的是各小波系数对 JND 的相对关系,其绝对大小并不重要,只要保证改进的模型与原模型高度相关即可,如图 4 所示,本节对  $16 \times 16$  小块的小波系数纹理掩蔽因子  $\Xi(r, i, j)$  ( $\delta = 0.2$  为调节因子)进行了统计,两模型之间呈现完全的相关性,这说明采用绝对值代替平方并没有改变纹理掩蔽因子的相对关系。本节改进的纹理掩蔽因子为

$$\Xi(r, i, j) = \sum_{k=0}^{3-r} \frac{1}{16^{k+1}} \times \sum_{\theta=0}^2 \sum_{x=0}^1 \sum_{y=0}^1 \left[ \left| I_{k+r}^{\theta} \left( x + \left\lfloor \frac{i}{2^k} \right\rfloor, y + \left\lfloor \frac{j}{2^k} \right\rfloor \right) \right| \right] \times \text{Var} \{ I_3^{\theta} \} \quad (10)$$

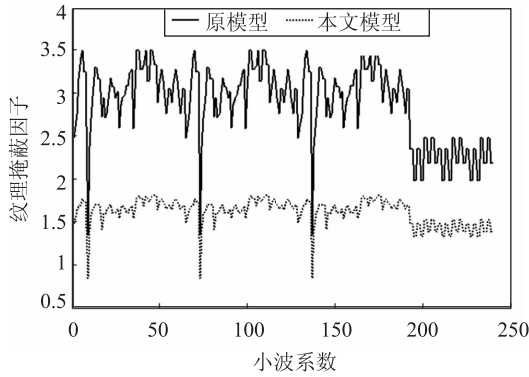


图 4 两种纹理掩蔽因子的统计模型

Fig. 4 The statistical model of two texture masking factors

## 4 嵌入算法及实验分析

### 4.1 基于视觉特性的失真测度与 STCs 算法的结合

第 2 节介绍了接近仿真最优编码的网格码 STCs, 给隐写算法的设计者提供了一个优良的底层编码, 它的输入参数为二进制的载体流 *Cover*、与载体流一一对应的失真测度  $\rho$  和秘密信息 *m*, 输出为二进制的隐写载体流 *Stego*. *Stego* 与 *Cover* 之间的失真依赖于失真测度  $\rho$  达到最小值; 第 3 节在 JND 模型上提出的基于视觉特性的失真测度正是对每一个小波系数附加一个失真测度, 反映了修改该小波系数对载体的影响, 因此失真测度值的大小是一种相对关系。本节利用小波系数的最低比特位和与之一一对应的

失真测度, 并结合 STCs 算法设计隐写算法。

### 4.2 秘密信息嵌入及提取过程

秘密信息嵌入过程:

1) 令图像的大小为  $M \times N$ , 先对图像进行  $16 \times 16$  分块, 总块数为  $\lfloor M/16 \rfloor \times \lfloor N/16 \rfloor$ , 对每块利用整数提升小波进行 3 层变换 (整数提升保证小波变换与逆变换不存在失真), 利用式 (7) 计算对每个小波系数修改带来的失真  $\rho_i$ 。由于第 3 层小波系数  $I_3^{\theta}$  的修改对图像影响较大, 在本方案中将其定义为湿像素<sup>[5]</sup>, 即  $\rho_i = \infty$ , 不用来嵌入秘密信息。

2) 提取每个小波系数的最低比特位作为二进制载体向量 *Cover* (长度  $\lfloor M/16 \rfloor \times \lfloor N/16 \rfloor \times 256$ )。将秘密信息 *m*、*Cover* 和与之相对应的失真测度  $\rho$  作为参数输入到 STCs 算法中, 得到隐写后载体向量 *Stego*。

3) 将 *Stego* 替换原小波系数的最低比特位, 并进行逆整数提升小波变换得到隐密图像。

在提取秘密信息时, STCs 算法只要输入载体向量 *Stego* 和嵌入秘密信息 *m* 的长度即可提取出所有秘密信息, 提取者不需要获得有关  $\rho$  的信息。

### 4.3 实验及分析

本方案实验图像为常用的 Lena 灰度图像 (大小为  $256 \times 256$  像素, 位深度为 8 比特) 和 UCID 图库<sup>[15]</sup>, 式 (7) 归一化参数  $\eta = 5$ , JND 中  $\delta = 0.2$ , STCs 中  $h = 10$ 。用于隐写分析的分类器为 C-SVC 支持向量机 (SVM), 非线性的径向基函数 (RBF) 作为核函数。隐写分析实验性能评价指标为平均检测错误  $P_E = (P_{F_p} + P_{F_n})/2$ , 其中  $P_{F_p}$  和  $P_{F_n}$  为虚警率和漏检率, 平均检测错误越大代表方案的安全性越好。

图 5(a)(b) 为 Lena 图像嵌入秘密信息前后的对比, 两图没有明显的差异。图 5(c) 为 PSNR 值与



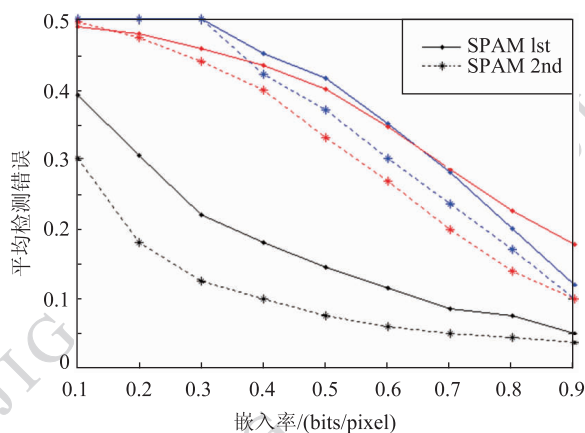
图 5 隐写算法视觉不可见性

Fig. 5 Imperceptibility of the proposed steganography method

嵌入容量的关系,当嵌入容量从 1/20 到 1/2 时,所有 PSNR 值都超过 59 dB,即提出的隐写算法具有良好的视觉隐蔽性,能抵抗视觉攻击。

由于本文是将空域中的灰度值进行小波变换后,在小波系数上进行秘密信息的嵌入,再将嵌密后的载体转换到空域,因此在隐写分析中分别选取空域和小波域中的特征进行测试,以较客观地检测所提算法的安全性。以下两个隐写分析实验,都从 UCID 图库中选择 1 338 幅  $512 \times 384$  像素的灰度图像,训练和测试各用 669 幅,嵌入率从 0.1 到 0.9 分别进行实验。

图 6 为本文方案、LSB 匹配和 HuGO<sup>[12]</sup> 的安全性对比,隐写分析特征为 Penvy 等人<sup>[11]</sup> 提出的差分像素邻接矩阵(SPAM),该特征能检测大部分空域和频域算法,具有良好的效果,实验中一阶特征 SPAM 1st 取参数  $T=4$ ,维数 163,二阶特征 SPAM 2nd 取参数  $T=3$ ,维数 687。根据图 6 中的实验结果,若以平均检测错误高于 0.4 作为安全容量的标准,LSB 匹配的安全容量不足 0.1 bits/pixel,而本文方案的安全容量在 SPAM 1st 和 SPAM 2nd 分析下都能达到 0.4 bits/pixel 左右,与 HuGO 算法的安全性相当。值得注意的是,LSB 匹配是当前实用性较强的算法,而 HuGO 是在 SPAM 的基础上提出的空域隐写算法,具有较强的安全性。



黑色: Ternary LSB Matching 蓝色: HuGO 红色: 本文方案

图 6 3 种方案的安全性比较

Fig. 6 Security comparisons of three methods

表 2 为利用小波域的 Farid 216 维特征<sup>[16]</sup> 对本文方案进行检测的安全性实验,该特征根据图像在小波分解时存在的高阶统计规律以及小波分解系数绝对值之间具有的线性相关性来达到隐写分析的目的,是小波域检测效果较好的算法。从表中实验结

表 2 利用 Farid 216 维特征<sup>[16]</sup> 对本文方案进行检测  
Table 2 Steganalysis against the proposed method using the feature of Farid 216<sup>[16]</sup>

嵌入率/(bits/pixel)	虚警率	漏检率	平均检测错误
0.1	0.491 8	0.479 8	0.485 8
0.2	0.807 2	0.191 3	0.499 3
0.3	0.621 8	0.290 0	0.455 9
0.4	0.355 8	0.475 3	0.415 5
0.5	0.240 7	0.429 0	0.334 8
0.6	0.257 1	0.312 4	0.284 8
0.7	0.212 3	0.243 6	0.228 0
0.8	0.143 5	0.231 7	0.187 6
0.9	0.100 1	0.206 3	0.153 2

果可知,所提方案的安全嵌入容量能达到 0.4 bits/pixel 左右,同样具有较好的效果。

综合两个隐写分析实验,所提算法的安全容量均在 0.4 bits/pixel 左右,具有较高的安全性。

## 5 结 论

在离散小波变换域提出了用于计算最小嵌入失真的失真测度函数,该函数结合了人眼视觉特性、整数提升小波变换和最小嵌入失真,减少了对载体的修改,实验结果表明该方案具有良好的视觉安全性和统计安全性。下一步工作将根据 Filler 等人提出的非加性失真函数、多层 STCs 和非二进制方法对本文方案进行改进,以获得更好的性能。

## 参考文献 (References)

- [1] Fridrich J, Filler T. Practical methods for minimizing embedding impact in steganography [EB/OL]. [2012-02-29]. <http://ws2.binghamton.edu/fridrich/publications.html#Steganography>.
- [2] Filler T, Judas J, Fridrich J. Minimizing Additive Distortion in Steganography using Syndrome-Trellis Codes [J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2011, 6(3):920-935.
- [3] Filler T, Judas J, Fridrich J. Minimizing Embedding Impact in Steganography using Trellis-Coded Quantization. [EB/OL]. [2012-02-29]. <http://ws2.binghamton.edu/fridrich/publications.html#Steganography>.
- [4] Filler T, Fridrich J. Minimizing Additive Distortion Functions

- With Non-Binary Embedding Operation in Steganography [C]// Proceedings of 2nd IEEE Workshop on Information Forensics and Security. Seattle, WA: IEEE Computer Society, 2010:1-6.
- [ 5 ] Filler T, Fridrich J. Gibbs construction in steganography [J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2010, 5(4):705-720.
- [ 6 ] Fridrich J, Goljan M, Soukal D. Writing on wet paper [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2005, 53(10):3923-3935.
- [ 7 ] Shannon C E. Coding theorems for a discrete source with a fidelity criterion [J]. IRE Nat. Conv. Rec., 1959, 4:142-163.
- [ 8 ] Viterbi A, Omura J. Trellis encoding of memory less discrete-time sources with a fidelity criterion [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1974, 20:325-332.
- [ 9 ] Han I, Merhav N. On the error exponent of trellis source coding [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2005, 51:3734-3741.
- [10] Sidorenko V, Zyablov V. Decoding of convolutional codes using asyndrome trellis [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1994, 40(5): 1663-1666.
- [11] Pevný T, Bas P, Fridrich J. Steganalysis by subtractive pixel adjacency matrix [J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2010, 5(2):215-224.
- [12] Pevný T, Filler T, Bas P. Using high-dimensional image models to perform highly undetectable steganography [C]// Proceedings of the 12th International Workshop on Information Hiding. Calgary, AB: Springer Verlag, 2010, 6387:161-177.
- [13] Lewis A S, Knowles G. Image compression using the 2-D wavelet transforms [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1992, 1(4): 244-250.
- [14] Barni M, Bartolini F, Piva A. Improved Wavelet-based Watermarking Through Pixel-wise Masking [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, 10(5): 783-791.
- [15] Schaefer G, Stich M. UCID—An uncompressed colour image database [R]. Nottingham, UK: School of Computing and Mathematics, Nottingham Trent University, 2003.
- [16] Farid H. Detecting Steganographic Messages in Digital Images: TR2001-412 [R]. Hanover, NH, USA: Dartmouth College, 2001.