

中图法分类号: TN918.91 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2011)02-0209-06

论文索引信息: 马秀莹, 林家骏. 信息隐藏性能评价方法[J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(2): 209-214

信息隐藏性能评价方法

马秀莹¹⁾, 林家骏²⁾

¹⁾ (上海应用技术学院计算机科学与信息工程学院, 上海 200235) ²⁾ (华东理工大学信息科学与工程学院, 上海 200237)

摘要: 建立信息隐藏技术的评价标准十分必要。隐写术的视觉不可感知性是评价隐写术性能的重要指标之一。基于 HVS 模型, 给出不可感知性评价指标 CHD。实验结果表明, CHD 的判定结果反映了人类视觉的亮度、对比度和色彩掩蔽特性, 可以作为隐写术的不可感知性评价指标。

关键词: 信息隐藏; 性能评价; HVS; 不可感知性; 峰值信噪比

Performance evaluation of information hiding

Ma Xiuying¹⁾, Lin Jiajun²⁾

¹⁾ (Computer Science & Information Engineering Department, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 200235 China)

²⁾ (School of Information Science & Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237 China)

Abstract: It is necessary to establish a benchmark for information hiding. Imperceptibility is an important index to evaluate the performance of steganography. Based on HVS model, a new imperceptibility measure CHD for color stego image was proposed. Experimental results show that the quality of stego image calculated by CHD reflects the luminance masking, texture masking and color masking of HVS, and CHD can be used to evaluate the imperceptibility of steganography tools.

Keywords: information hiding; evaluation; HVS; imperceptibility; peak signal to noise ratio

0 引言

信息隐藏是信息安全领域的一大重要分支, 信息隐藏作为一门交叉学科, 涉及数学、密码学、信息论、计算机视觉以及其他计算机应用技术, 是各国研究者所关注和研究的热点^[1-4]。但是, 现已发表的文献都侧重于对秘密消息的嵌入、检测方法的研究, 而对信息隐藏技术的本质性能缺乏全面、客观和统一的评价标准^[5-6]。

建立信息隐藏算法的评价基准包括很多个方面, 一般来说, 这些方面的指标是互相冲突的, 不可能同时达到最好, 而不可感知性是其中最基本的要求。对于不可感知性的评价有两种方法。1) 主观评价方法: 通过设计二选一迫选实验, 组织观测者对

图像质量进行评价。其评价结果和人的主观感受相符但费时、费力, 受观测者专业背景和观测动机、观测环境等因素的限制和影响, 具有一定的不确定性; 2) 客观评价方法: 通过算法将感知误差量化为一定的数值, 比较数值的大小直接对图像质量进行评定。算法方便、快捷, 能结合到应用系统中但和人的主观感受不符。

目前, 许多研究者将峰值信噪比 (PSNR) 作为一个重要的甚至唯一的客观评价指标。但是, 信息隐藏的本质机理不是简单的信号与噪声的关系, 所以 PSNR 不宜用做信息隐藏算法的评价指标。为了获得与主观评价结果相一致的客观评价值, 结合人类视觉系统 (HVS) 模型的客观评价方法成为研究重点。

从客观评价信息隐藏技术的性能指标出发, 提出了基于人类视觉系统的彩色掩密图像不可感知性

收稿日期: 2009-05-19; 修回日期: 2009-10-13

第一作者简介: 马秀莹 (1975—), 女, 讲师。2010 年于华东理工大学获检测技术与自动化装置专业博士学位, 主要研究方向为信息安全、数字水印、图像隐写及隐写分析等。E-mail: maxiuyingyuyu@163.com。

评价指标 CHD, 该指标将感知质量与信息隐藏方法的容量有机结合, 并且可以反映图像的局部失真情况, 从而对算法的改进具有指导意义, 促进信息隐藏技术的发展。实验结果表明, 用 CHD 可以对隐写术的不可感知性进行客观评价。

1 基于 HVS 的不可感知性评价方法

为了获得和观测者的主观感受相一致的评价结果, 基于 HVS 模型的算法通过对 HVS 的某些底层特性进行建模, 将掩密图像和原始净图之间的绝对误差映射为能被人眼觉察的 JND (just noticeable difference) 单位。当误差小于视觉的敏感阈值时, 人眼不能察觉该差异, 反之可以察觉。

基于 HVS 模型的算法首先将整幅图像分成规则的图像块, 然后将图像块根据不同的空间频率和方向分解为通道。在每个通道上加入时-空滤波器, 模拟 HVS 的底层特性, 计算误差图像在参考图像的背景下可感知的程度, 从而得到整幅图像上的感知误差的平均值。最后建立模型, 将其与图像的主观评价价值联系起来, 并在训练集上估计模型参数。这类方法综合模拟 HVS 的各项特性, 能够较好地保证

主客观评价的一致性^[7]。

2 基于 HVS 的不可感知性评价指标

2.1 HVS 模型

HVS 具有如下特点: 1) 亮度掩蔽: 是指对图像不同亮度区域进行同等幅度的修改时, 显示的视觉效果不相同的现象。通常, 对于平均亮度大的区域可以进行较大幅度的修改。2) 对比度掩蔽: 是指 HVS 对刺激信号的响应取决于刺激相对于背景的局部变化, 即刺激信号的背景对比度。当背景和刺激在方向、空间频率和时间频率非常接近时, 掩蔽效果达到最大。3) 色彩掩蔽: 是指人眼对不同的颜色分量表现出不同的视觉敏感性, HVS 对蓝色的敏感性最低, 对绿色的敏感性最高。

人眼视觉系统模型 (HVS) 中给出了视觉系统的频率响应函数, 如下式所示^[8]:

$$H(\omega) = \begin{cases} 0.05e^{\omega^{0.554}} & \omega < 7 \\ e^{-9(1\lg\omega - \lg 9)^{2.3}} & \omega \geq 7 \end{cases} \quad (1)$$

2.2 基于 HVS 的彩色图像评估指标 CHD

基于 HVS 模型计算感知误差 CHD, 评价隐写算法的不可感知性的过程如图 1 所示。

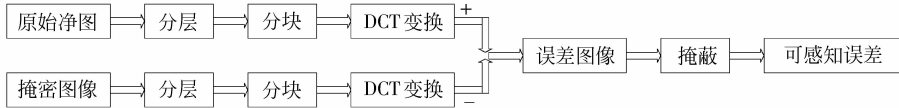


图 1 CHD 计算过程

Fig. 1 Progress of computing CHD

1) 将原始净图 C 和掩密图像 S 分为 R, G, B 3 层, 分别记为 C_R, C_G, C_B 和 S_R, S_G, S_B 。

2) 分块及 DCT 变换: 将 C_R, C_G, C_B 和 S_R, S_G, S_B 分为 K 个互不重叠的 $P \times P$ 分块, 计算各分块的 DCT 系数矩阵, 分别记为 $C_{ijkR}, C_{ijkG}, C_{ijkB}$ 和 $S_{ijkR}, S_{ijkG}, S_{ijkB}$, 其中 i, j 为每一图像块中的行列下标, k 为图像各分块的编号, $k = 1, 2, \dots, K$ 。

3) 计算原始净图和掩密图像各层的 DCT 系数差, 求得 DCT 系数的误差图像 E 。

$$\begin{cases} e_{ijkR} = C_{ijkR} - S_{ijkR} \\ e_{ijkG} = C_{ijkG} - S_{ijkG} \\ e_{ijkB} = C_{ijkB} - S_{ijkB} \end{cases} \quad (2)$$

$i, j = 1, 2, \dots, P; k = 1, 2, \dots, K$

$e_{ijkR}, e_{ijkG}, e_{ijkB}$ 分别表示 R, G, B 各层第 k 分块 ($i,$

j) 位置的 DCT 系数差值。

4) HVS 掩蔽: 将掩密图像和原始净图之间的绝对误差映射为可感知误差。

由于径向频率 ω 可用 2 维 DCT 变量 (i, j) 表示, 即

$$\omega = \frac{16}{P} \sqrt{i^2 + j^2} \quad i, j = 1, 2, \dots, P$$

式 (1) 可以表示如下

$$h_{ij} = \begin{cases} 0.05e^{(\frac{16}{P} \sqrt{i^2 + j^2})^{0.554}} & \sqrt{i^2 + j^2} < \frac{7}{16}P \\ e^{-9(\lg(\frac{16}{P} \sqrt{i^2 + j^2}) - \lg 9)^{2.3}} & \sqrt{i^2 + j^2} \geq \frac{7}{16}P \end{cases} \quad (3)$$

因此, 在 R, G, B 各层每块中, 各类频率的感知误差, 即每一个像素的感知误差 $d_{ijkR}, d_{ijkG}, d_{ijkB}$ 可表示为

$$\begin{aligned}d_{ijk r} &= h_{ij} * e_{ijk r} \\d_{ijk g} &= h_{ij} * e_{ijk g} \\d_{ijk b} &= h_{ij} * e_{ijk b}\end{aligned}\tag{4}$$

5)对误差进行合并,求得整体感知误差。

文献[9]中实验表明,当加权比例选取为 R: G: B = 2: 1: 4 时,对于保证图像质量最为有利。因此,采用该比例对 R,G,B 各层的感知误差进行加权,得到 CHD 计算公式:

$$CHD = 10\lg \frac{3MN \{ \max(x) \}^2}{\sum_k \sum_{i,j} \left[\left\| \frac{2}{7} d_{ijk r} \right\|^2 + \left\| \frac{1}{7} d_{ijk g} \right\|^2 + \left\| \frac{4}{7} d_{ijk b} \right\|^2 \right]}\tag{5}$$

式中, $\max(x)$ 为图像 DCT 系数的最大值, $M \times N$ 为图像的大小。

为便于分析,引入彩色图像峰值信噪比 (PSNR) 计算公式^[10]

$$PSNR = 10\lg \frac{255^2}{(MSE_r + MSE_g + MSE_b)/3}\tag{6}$$

式中 MSE_r, MSE_g, MSE_b 分别表示图像 R, G, B 分量的均方差。

HVS 是一个非线性系统,而 PSNR 是从总体上对隐写前后的误差数据做线性统计描述。隐写算法为了抵抗一定的攻击,同时又不产生明显的视觉失真,在图像的视觉感知不明显的地方嵌入了大量的隐秘信息,使得图像各部分引入的误差极不平衡,而 PSNR 无法反映这种特性。可见,PSNR 有明显的局限性。

图 2 给出了一个实验,在图 2(b)中加有均匀分布的高斯白噪声,而(c)–(e)3 幅图像中分别加有集中分布噪声,图(c)中表现为一个方块,图(d)中表现为两个方块,图(e)中表现为 3 个方块。人眼可以很轻易地看出它们之间的差别,但是这些图像的 PSNR 值却完全相同。可见,峰值信噪比与人眼的视觉特性存在着差异,而基于 HVS 的彩色图像失真测度 CHD 值不同,表现出与人类视觉相适应的特性。随着噪声块的增加,图像的质量发生显著改变,而 CHD 呈现递减趋势,很好地反映了图像质量的这种变化。显然,图像质量越好,CHD 值越大。

2.3 CHD 与色彩掩蔽

由于 HVS 的色彩掩蔽特性,当 R,G, B 各层中嵌入了相同容量的隐秘信息时,人眼可以感觉到 G 层嵌入隐秘信息的图像产生了明显的降质,而 B 层嵌入隐秘信息的图像质量没有发生明显的变化。接

下来的实验表明提出的不可感知性评价指标 CHD 充分考虑了 HVS 色彩掩蔽特性,可以反映图像质量的这种变化。

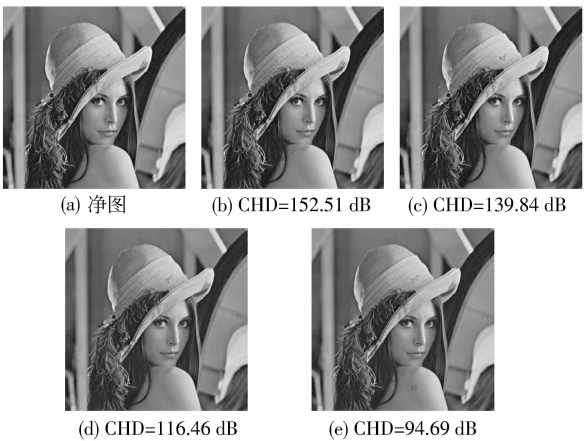


图 2 PSNR = 37 dB 图像的 CHD 实验结果
Fig. 2 CHD for images with the same PSNR = 37 dB

实验中,采用基于空域的 LSB 方法分别对图 3(a)所示的彩色 pepper 图像的 3 个颜色分量 R, G,B 嵌入相同容量的掩密信息,得到 3 幅掩密图像分别如图 3(b)–(d)所示。

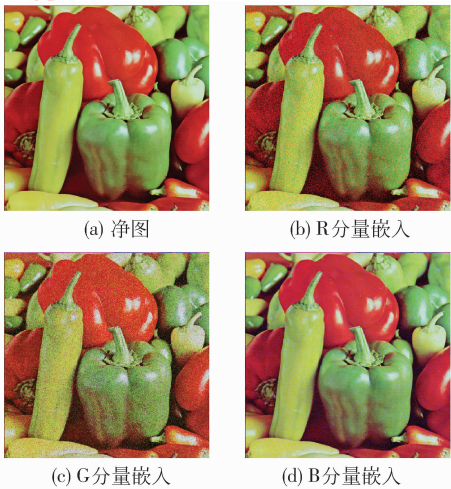


图 3 不同颜色分量嵌入相同秘密信息时的掩密图像
Fig. 3 Images hidden same messages at different level

对各掩密图像计算所得的 PSNR 和 CHD 如表 1 所示。

从实验数据可以看出:

- 1)主观评价。B 层嵌入隐秘信息的图 3(d)的质量最好,G 层嵌入隐秘信息的图 3(c)质量最差。
- 2)客观评价指标 PSNR。如表 1 所示,3 个 PSNR 值非常接近,即 3 幅彩色掩密图像的视觉质

量几乎相同,这个结论显然不符合图像真实情况。

3) 客观评价指标 CHD。如表 1 所示,G 层嵌入隐秘信息得到的图像的 CHD 值最小,说明图像质量最差,评价结果与主观评价结果相符。

表 1 不同颜色分量嵌入秘密信息的掩密图像 PSNR,CHD
Tab.1 PSNR, CHD for different level

Level	PSNR	CHD
R	24.009 3	116.132 0
G	24.586 5	106.479 7
B	24.610 3	119.133 5

2.4 CHD 与亮度和纹理掩蔽

由于 HVS 的亮度和纹理掩蔽特性,当在图像中嵌入相同容量的隐秘信息时,人眼可以感觉到平均亮度大的图像和纹理复杂的图像表现出较好的质量。

用 Hide in picture 嵌入工具,分别对图 4 所示的彩色图像嵌入不同容量的秘密信息,得到一系列掩密图像。用 PSNR 和 CHD 进行分析评价的实验结果,分别由图 5 和表 2 给出。

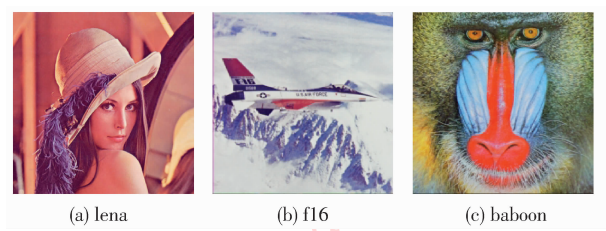


图 4 原始净图
Fig.4 cover images

如图 5 所示,
1) CHD 值随着嵌入容量的增大而减小。
2) CHD 值大于 PSNR 值,对于不同的图像,CHD 值相对于 PSNR 值的增加幅度并不相同。
记 $D = CHD - PSNR$,表 3 给出了 3 幅图像的 D 值。

由表 3 可见:
1) 对于同一嵌入容量, baboon 的增加幅度高于其余两幅图像。这是由于 CHD 考虑了纹理掩蔽的影响,而 baboon 的纹理比其他两幅图像复杂。

2) Lena 和 f16 的纹理程度相似,但是 f16 的亮度高于 Lena,因此, f16 的增加幅度又高于 Lena。

如上所述,评价指标 CHD 的评价结果反映了 HVS 的亮度掩蔽,对比度掩蔽和色彩掩蔽特性,与主观评价结果一致,下面采用该指标对隐写术的不可感知性进行评价。

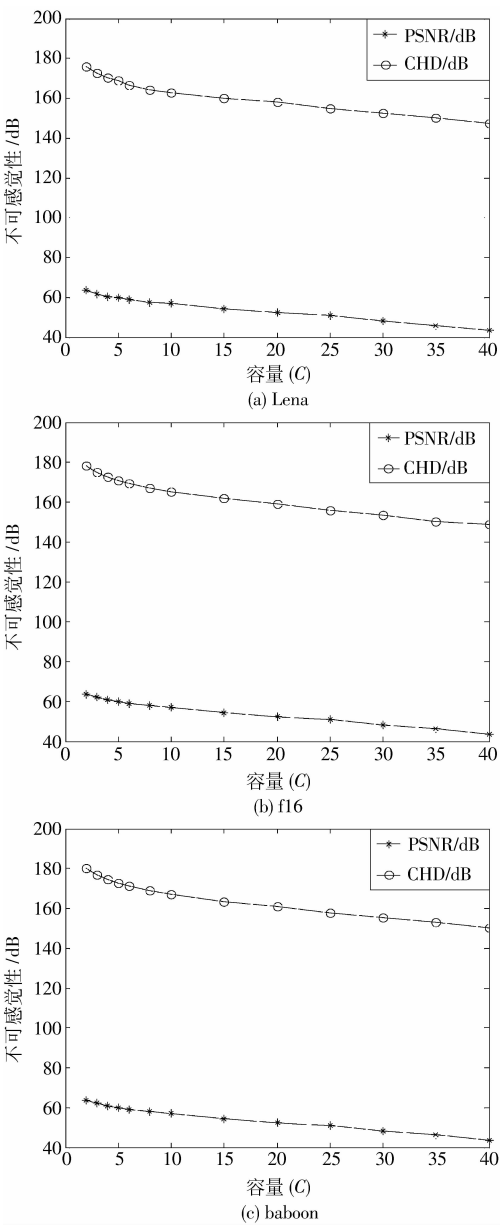


图 5 lena,f16,baboon 图像嵌入不同容量时的 PSNR 和 CHD 曲线

Fig.5 PSNR,CHD curves for lena,f16 and baboon embedding with different messages

表 2 Lena,f16,baboon 图像嵌入不同容量时的 PSNR 和 CHD
Tab.2 PSNR,CHD for lena,f16 and baboon embedding with different messages

容量 (C) /%	Lena		f16		baboon	
	PSNR	CHD	PSNR	CHD	PSNR	CHD
2	63.573 1	175.833 7	63.706 0	178.066 0	63.709 5	180.248 9
5	59.802 0	168.703 1	59.883 6	170.917 0	59.848	172.782 7
10	56.884 5	163.019 6	56.881 1	164.998 4	56.879 5	166.982 7
20	52.488 7	157.925 2	52.509 9	158.950 1	52.474 4	160.831 2
30	48.001 5	152.463 4	48.025 1	153.349 1	48.034 9	155.536 9
40	43.550 5	147.429 9	43.574 8	148.654 0	43.556 4	150.211 7

表 3 Lena,fl6,baboon 图像嵌入不同容量时的 D 值/dB

Tab.3 D /dB for lena,fl6 and baboon embedding with different messages

容量 (C)/%	Lena	fl6	baboon
2	112.260 6	114.360 0	116.539 4
5	108.901 1	111.033 4	112.934 7
10	106.135 1	108.117 3	110.103 2
20	105.436 5	106.440 2	108.356 8
30	104.461 9	105.324 0	107.502 0
40	103.879 4	105.079 2	106.655 3

表 4 不同容量下各种隐写软件的 CHD/dB

Tab.4 CHD/dB for different steganography tools with varies embedding capacity

容量 (C)/%	Hide in Picture	Stash It	Jsteg-Shell
1	181.627 2	168.779 6	161.150 1
2	177.543 0	164.997 5	158.670 5
5	170.359 4	161.471 7	156.253 3
10	164.577 5	159.016 3	154.821 7
20	158.982 7	156.740 1	—
30	153.533 1	—	—
40	152.443 1	—	—

3 隐写术不可感知性评价

3.1 CHD 指标评价结果

从隐写算法原理分析,基于空域随机嵌入的 LSB 方法 Hide in Picture 对原始净图的修改最小,不可感知性最好;与图像复杂度有关的空域算法 Stash It 的效果稍次;修改 DCT 域系数最低比特位变化的 Jsteg-Shell 对除 0,1 之外的中高频系数均进行了修改,引入的失真最大,不可感知性最差。

实验中,采用 1 000 幅图像(图像来自 USC-SIPI Image Database 和数码相机),分别用 Hide in picture, Stash It 和 Jsteg-Shell 3 种嵌入工具,嵌入不同容量的秘密信息,得到一系列掩密图像,用 CHD 均值进行分析评价的实验结果如图 6 所示。表 4 给出部分实验数据。

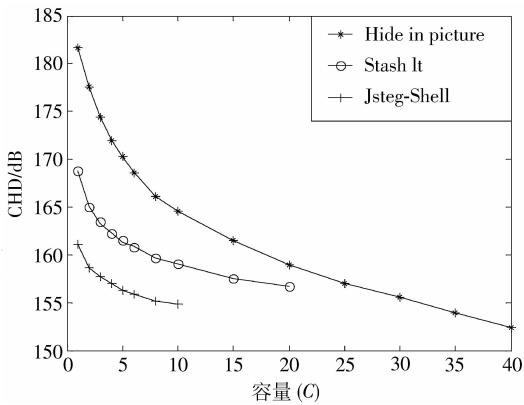


图 6 不同隐写软件 CHD 分布

Fig.6 CHD distribution for different steganography tools

从 CHD 值分析:Hide in Picture 的不可感知性最好,Stash It 次之,Jsteg-Shell 的不可感知性最差。这个结论与我们的直观观察结果一致,表明了本文提出的评价指标 CHD 的有效性。

大量实验表明,CHD 值的可接受范围为大于 150 dB。

3.2 局部失真情况表示

以往文献中描述的各种不可感知性评价指标例如 SNR,PSNR,WSNR(weighted signal to noise ratio),MPSNR(masked peak signal to noise ratio)均得出了总体失真情况作为评价价值以比较不同隐写软件的不可感知性,却不能表征图像各个区域的失真情况。

设原始净图 C 和掩密图像 S 的大小为 $M \times N$,将 C 和 S 分为 K 个互不重叠的 $P \times P$ 分块,则分块个数 K 为

$$K = \frac{M \cdot N/3}{P^2} \tag{7}$$

第 C 层第 k 个分块的感知误差 CHD_{kC} ($k = 1, 2, \dots, K, C \in \{R, G, B\}$) 表示为

$$CHD_{kC} = \sum_{i,j=1}^P d_{ijkC} = \sum_{i,j=1}^P h_{ij} * (C_{ijkC} - S_{ijkC}) \tag{8}$$

式中, C_{ijkC} 和 S_{ijkC} 分别表示原始净图和掩密图像第 C 层第 k 分块 (i, j) 位置的 DCT 系数值, d_{ijkC} 为求得的相应误差。

由式(8)可见,各个分块的感知误差不同,即图像各个区域的失真情况并不相同,对于同一区域,R,G,B 各层的失真情况也不一样。了解局部失真情况有助于在今后对隐写算法进行改进,从而促进隐写术以及隐写分析技术的发展,这也正是建立评价标准的目的之一。

4 结 论

随着信息安全领域的发展需求,信息隐藏技术的研究不断深入,建立相应的性能评价标准势在必行。提出的隐写术不可感知性评价指标 CHD,反映了人类视觉系统的特性,因此,评价结果与主观评价

结果相符,可以对隐写术的不可感知性进行客观公正的评价。这只是一个初步探索,如何得出更具全面性、客观性的信息隐藏性能评价标准,许多问题还有待于继续研究和解决。

参考文献 (References)

- [1] Jessica Fridrich, Petr Lisonek, David Soukal. On Steganographic Embedding Efficiency [C]// Information Hiding, 8th International Workshop. Alexandria, VA: Springer-Verlag, 2008, (4437): 282-296.
- [2] Andrew D Ker. Steganographic Strategies for a Square Distortion Function [C]// Proceedings SPIE, Electronic Imaging, Security, Forensics, Steganography, and Watermarking of Multimedia Contents. San Jose, CA, USA, Washington: SPIE, 2008(6819): 1-13.
- [3] Parvez, Mohammad Tanvir, Gutub Adnan. RGB intensity based variable-bits image steganography [C]// APSCC 2008- Proceedings of 3rd IEEE Asia-Pacific Services Computing Conference. Taiwan: IEEE Press, 2008: 1322-1327.
- [4] Li Xiaolong, Yang Bin, Cheng Daofang, et al. A generalization of LSB matching signal processing letters [J]. Signal Processing Letters, IEEE, 2009. 69-72.
- [5] Kong Xiangwei, Cu Rufeng, Ba Xiaohu, et al. A perception evaluation scheme for steganography [C]// Fourth International Conference on Intelligent Data Engineering and Automated Learning. Hong Kong, China: Springer-Verlag, 2003: 426-430.
- [6] Andrew D Ker. Quantitative evaluation of pairs and RS steganalysis [C]// Security, Steganography, and Watermarking of Multimedia Contents VI. San Jose, CA, USA: SPIE, 2004, 19(1): 83-97.
- [7] Wang Zhou, Bovik A C. A human visual system based objective video distortion measurement system [C]// International Conference on Multimedia Processing and Systems. Washington DC, USA: IEEE Press, 2001: 34-39.
- [8] Tan S H, Ngan K N. Classified perceptual coding with adaptive quantization [J]. IEEE Transactions on Circuits System for Video Technology, 1996, 37(6): 375-388.
- [9] Wang Xiangyang, Yang Hongying, Chen Like. New color image watermarking based on adaptive quantization [J]. Mini-Micro Systems, 2005, 26(9): 1525-1529. [王向阳, 杨红颖, 陈利科. 基于人眼视觉系统的自适应量化数字水印算法研究 [J]. 小型微型计算机系统, 2005, 26(9): 1525-1529.]
- [10] Hamad Hassan M, Gilani S A M. A fragile watermarking scheme for color image authentication [J]. Transactions on Engineering, Computing and Technology, 2006, 13: 312-316.