

文章编号: 1001-0920(2011)04-0577-05

一种抗 SPA 的非对称信息隐藏算法——ALRS 算法

唐明伟¹, 范明钰¹, 王光卫¹, 郑秀林²

(1. 电子科技大学 计算机科学与工程学院, 成都 610054; 2. 北京电子科技学院 信息安全系, 北京 100070)

摘要: 通过研究样本对分析(SPA)方法, 提出一种抗 SPA 方法非对称最不重要位(LSB)信息隐藏算法——ALRS 算法. 首先, 分析相邻像素结构体的性质; 然后, 从理论上证明能够找到一个单调的修复图像像素统计特性的相邻像素结构体序列. 实验结果表明, 该算法不仅能够有效抵抗 SPA 统计分析方法, 而且其算法实现简单, 计算量小, 性能优于其他算法.

关键词: 最不重要位; 信息隐藏; 样本对分析方法; 相邻像素结构体

中图分类号: TP273

文献标识码: A

An asymmetric LSB information hiding algorithm of resisting SPA

TANG Ming-wei¹, FAN Ming-yu¹, WANG Guang-wei¹, ZHENG Xiu-lin²

(1. School of Computer Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China; 2. Department of Information Security, Beijing Electronic Science and Technology Institute, Beijing 100070, China. Correspondent: TANG Ming-wei, E-mail: tang4415@126.com)

Abstract: Asymmetric LSB hiding algorithm of resisting SPA(ALRS) is a least significant bit(LSB) information hiding algorithm of resisting sample pair analysis(SPA), which is able to analyze some properties of the image fixel pairs. Based on the properties, a monotonous sequence of restoration is found by using ALRS. The sequence can amend the statistic properties of the pair. The experiment results show that the method can resist the attack of SPA and its performance is better than others in the efficiency and security of information hiding.

Key words: least significant bit; information hiding; sample pair analysis; structure of adjacent pixels

1 引言

信息隐藏是一种秘密通信方式. 它将秘密信息以某种方式隐藏在特定的载体中. 载体可以是数字文本、图像、多媒体等. 基于数字图像的信息隐藏技术可分为空域和变换域信息隐藏技术. 空域信息隐藏技术通常采用最不重要位(LSB)替换法, 该方法虽然抗干扰性较差, 但其隐藏容量大, 对原始数据的修改很小, 是一种广泛使用的信息隐藏技术^[1].

Westfeld 等人^[2]提出一种基于 χ^2 的分析方法, 能有效地分析顺序 LSB 信息隐藏, 但不能对随机 LSB 信息隐藏进行分析判断. 随后, Fridrich 等人^[3]提出了 RS (regular and singular groups) 信息隐藏分析方法, 通过统计图像中正则组和奇异组上的数量来估计信息的嵌入长度. 此算法既适合灰度图像, 又适合彩色图像, 能够估计随机信息嵌入, 但其精确性不高.

Sorina Dumitrescu 等人^[4]通过对图像相邻像素值的统计分析, 提出了 SPA (sample pair analysis) 信息隐藏分析方法. 该方法通过分析信息隐藏前后载体图像统计性质, 利用有穷状态机建模, 依靠状态转换建立关于信息隐藏率 p (隐藏率 $p =$ 秘密信息比特数/载体图像像素值数量 $\times 100\%$) 的二次方程, 并求解该方程以判断是否隐藏有信息以及隐藏信息的量. 当信息隐藏率 $p \geq 5\%$ 时, 得到最接近于信息实际隐藏率的估计值. 文献 [5] 指出, RS 方法与 SPA 方法在统计分析上是等价的; 但在判断准确性等方面, SPA 方法优于 RS 方法. 因此, 本文主要针对 SPA 方法进行分析.

上述隐藏分析方法的基本思想是根据自然图像像素值的统计性质进行分析. 人们通过研究上述分析方法, 设计出新的隐藏方法以抵抗上述隐藏分析方法.

收稿日期: 2010-01-08; 修回日期: 2010-05-31.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60272091, 60373109); 国家863计划项目(2009AA012403, 2009AA012435); 北京电子科技学院开放基金项目(KFHT200704).

作者简介: 唐明伟(1978—), 男, 讲师, 博士生, 从事计算机网络、网络与信息安全等研究; 范明钰(1962—), 女, 教授, 博士生导师, 从事计算机网络、网络与信息安全等研究.

法的攻击^[6-7]. 罗向阳等人^[8]提出一种针对 SPA 方法的动态补偿 LSB 信息隐藏算法 (DCLS), 该方法能有效抵抗 SPA 方法. 但 DCLS 算法的补偿过程是非线性的, 依靠穷举方法不断测试, 寻找最佳补偿值. 其算法的时间复杂度为 $O(n^4)$, 实现的代价较大. DCLS 方法混合使用两种替换方法 (F1 和 F-1), 会造成 SPA 方法的有限状态机模型不闭合. 文献 [9] 提出了另一种抗 SPA 统计的图像信息隐藏方法, 但结果表明, 该方法没有 DCLS 方法效果好.

针对以上不足, 本文提出一种可抗 SPA 分析方法的非对称的 LSB 信息隐藏算法——ALRS 算法. 分析与实验结果表明, ALRS 算法在准确性、灵活性和代价等方面均优于 DCLS 等算法.

2 基本概念

定义 1^[4] Y_{2m+1} 表示相邻像素值对差值为 $2m+1$, 较大数为奇数的集合; X_{2m+1} 表示相邻像素值对差值为 $2m+1$, 较大数为偶数的集合; Y_{2m} 表示相邻像素值对差值为 $2m$, 较大数为奇数的集合; X_{2m} 表示相邻像素值对差值为 $2m$, 较大数为偶数的集合.

自然图像满足以下两个条件^[4,8]:

$$E\{|Y_{2m+1}|\} = E\{|X_{2m+1}|\},$$

$$E\left\{\bigcup_{m=0}^j |Y_{2m+1}|\right\} = E\left\{\bigcup_{m=0}^j |X_{2m+1}|\right\}.$$

根据上述条件和文献 [4] 中的模型, 推导并得出关于信息隐藏率 p 的二次多项式

$$a_m p^2 - b_m p + \delta_m = 0, \quad (1)$$

$$a p^2 - b p + \delta = 0. \quad (2)$$

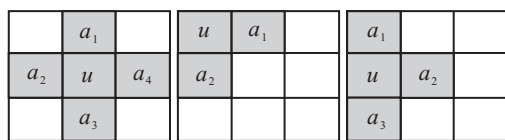
经求解可得到 p 的估计值.

式 (1) 和 (2) 的系数 a_m, a, b_m, b 与常数项 δ_m 的表达式见文献 [4,8]; 而

$$\delta = \sum_{m=0}^j (|Y'_{2m+1}| - |X'_{2m+1}|), \quad (3)$$

其中 ' 表示信息隐藏后的值.

定义 2^[10] 设像素的相邻像素结构体 (PFC) 组成的集合用 PFC 表示, u 为一结构体的中心元, 如图 1 所示.



(a) 结构 1 (b) 结构 2 (c) 结构 3

图 1 u 的相邻像素结构体

$\forall \text{pfc} \in \text{PFC}$, pfc 具有图 1 所示的 3 种结构中的

任一种. 其统计值 δ_{pfc} 由下式计算得到:

$$\delta_{\text{pfc}} = \sum_{m=0}^j (|Y'_{2m+1}| - |X'_{2m+1}|). \quad (4)$$

从式 (1) 或 (2) 分析可得, δ 决定其根 p 的大小. 因此, 通过减小 δ 值, 能够达到减小 p 值的目的. 当 δ 接近于 0 时, p 值越小. 这里只给出本文所需要的基本概念, 其余相关概念和定理参见文献 [4,8,11].

3 ALRS 算法原理

ALRS 算法的原理是, 将载体图像分为嵌入部分 (秘密信息隐藏在此部分) 和修复部分. 在嵌入部分, 完成秘密信息隐藏; 在修复部分, 完成对整个图像统计性质的修复. 对于修复部分, 具体是将具有相邻关系的像素构造成相邻像素结构体, 如图 1 所示, 并将这些结构体组成 PFC 集合. 在 PFC 中, 每个相邻像素结构体作为一个独立单元, 修改该单元的统计特性, 不会改变该单元以外结构体单元的统计特性, 即相邻像素结构体之间统计性质是独立的. 通过修改任意一个 pfc 来改变 δ_{pfc} 值, 最终达到修复 δ 的目的. pfc 结构体之间的独立性保证了修改过程是一个单调的过程, 即单调增加或单调减小 δ 的过程, 最终使得 δ 接近 0 或等于 0.

当 $\delta > 0$ 时, 在修复部分, 寻找相邻像素结构体. 该结构体在某种运算下能够减小 δ . 将这些具有相同性质的结构体组成一个序列, 该序列能使 δ 单调减少; 反之, 能够找到一个使得 δ 单调增加的结构体序列, 该序列最终使得 δ 值接近或等于 0. 该序列的相关参数作为密钥的一部分, 提高了 ALRS 算法的安全性.

下面将从理论上证明, ALRS 算法通过某种运算能找到一个单调的修复 δ 的相邻结构体序列, 以修复图像的统计性质. 定义该运算为 Rev 运算.

定义 3 (Rev 运算) 设 $\text{pfc} \in \text{PFC}$, u 为 pfc 的中心元, Rev 运算表示对 pfc 的 u 的像素值 LSB 取反. Rev(pfc) 等价于直接对 u 的 LSB 求反, 即 $\text{Rev}(\text{pfc}) \equiv \text{Rev}(u)$.

1) 如果 $u \bmod 2 = 1$, 则 $\text{Rev}(u) \bmod 2 = 0$;

2) 如果 $u \bmod 2 = 0$, 则 $\text{Rev}(u) \bmod 2 = 1$.

当 pfc 进行 Rev 运算后, 得到 pfc' , 则由下式求 pfc' 的 $\delta_{\text{pfc}'}$:

$$\delta_{\text{pfc}'} = \sum_{m=0}^j (|Y'_{2m+1}| - |X'_{2m+1}|). \quad (5)$$

在 Rev 运算时, pfc 的状态变化模型转换成图 2 所示的模型. 若 $(u, v) \in \text{pfc}$, u 为中心元, 则 1 表示 u 进行 Rev 运算; 0 表示 v 不变. 设 $(u, v) \in X_{2m-1}$, 若对 u 进行 Rev 运算, v 保持不变, 则运算后可能会有 $(u, v) \in Y_{2m}$ 或 $(u, v) \in X_{2m}$. 其他情况类似. δ_{pfc} 变成

$\delta_{pfc'}$ 会出现3种情况: 增大 ($\delta_{pfc'} > \delta_{pfc}$), 减小 ($\delta_{pfc'} < \delta_{pfc}$), 不变 ($\delta_{pfc'} = \delta_{pfc}$). 因此, 下面定义这3种情况下的相邻像素结构体.

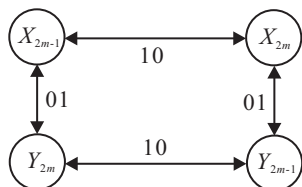


图2 pfc结构体中Rev(u)的有限状态图

定义4 D型结构体(又称减型结构体)

$$\delta_{pfc'} < \delta_{pfc}, \forall pfc \in PFC.$$

定义5 I型结构体(又称增型结构体)

$$\delta_{pfc'} > \delta_{pfc}, \forall pfc \in PFC.$$

定义6 ID型结构体(又称恒等型结构体)

$$\delta_{pfc'} = \delta_{pfc}, \forall pfc \in PFC.$$

定义7 载密图像像素统计性质 δ 值可修复性

$$-\delta_I \leq \delta \leq \delta_D.$$

其中: δ 为载密图像经式(3)求得的实际值, δ_D 为D型结构体能够减少的最大值, δ_I 为I型结构体能够增加的最大值.

性质1^[10] 任意一个结构体有唯一中心元.

性质2 任意一幅图像是由D型结构体, I型结构体和ID型结构体构成.

性质3^[4] 载密图像像素统计性质可修复性, 即 δ 修改后为 δ' , δ' 值接近于自然图像的0值.

定理1(独立性) 在进行Rev运算时, 任意PFC结构体都只会改变其结构体的统计特性, 而保持结构体以外的统计性质不变, 即PFC结构体之间是统计独立的.

证明 $\forall pfc \in PFC$, 由性质1知, 设 u 是pfc中心元. S 是图像像素组成的集合, S_{pfc} 是pfc结构体的像素值组成的集合. 如果存在 $s \in S \wedge s \notin S_{pfc}$, 则pfc在Rev运算下改变了 u 和 s 的统计性质. 因 $u \in S_{pfc}$, 由定义2可知, s 与 u 的关系是图1所示的一种, 即 $s \in S_{pfc}$, 这与假设 $s \notin S_{pfc}$ 矛盾, 故命题成立. \square

定理2 进行Rev运算后, 任意D型结构体将减小 δ ; 任意I型结构体将增大 δ ; 任意ID型结构体将不改变 δ .

证明 $\forall pfc \in D$, 由式(4)求 δ_{pfc} . pfc进行Rev运算后, 由式(5)求 $\delta_{pfc'}$. 由定理1可知, 在Rev运算下, 结构体之间是独立的, 则pfc进行Rev运算前图像 $\delta = \delta_{pfc} + \delta_{PFC}$, 其中 $PFC = pfc \cup PFC'$; pfc进行Rev运算后, $\delta' = \delta_{pfc'} + \delta_{PFC}$. 由定义4, $\delta_{pfc'} < \delta_{pfc}$, 故 $\delta' < \delta$. 因此Rev运算下, D型结构体能够减小 δ .

同理可证, 任意I型结构体将增大 δ ; 任意ID型结构体将不改变 δ . \square

定理3(存在性) 如果 $\delta > 0$, 则图像中一定存在D型结构体; 如果 $\delta < 0$, 则图像中一定存在I型结构体.

证明 文献[4]指出, 对于自然图像, $\delta = 0$. 设 u 为中心元. 如果 $\delta > 0$, 假设不存在D型结构体, 则由性质2可知, 只存在I型结构体和恒等结构体. 由定理2可知, 恒等结构体不改变, 下面只考虑I型结构体.

设 $\forall pfc \in I$, pfc在Rev运算前后的值分别为 δ 和 δ' . 由定理2可得, $\delta < \delta'$. 因为 $\delta > 0$, 所以 $\delta' > \delta > 0$. δ' 越来越大, 不可能为0, 即图像统计性质不可修复. 这与性质3相矛盾. 因此一定存在D型结构体.

同理可证, 当 $\delta < 0$ 时, 一定存在I型结构体. \square

定理4 在进行Rev运算下, 如果 $\delta > 0$, 则一定存在一个使得 δ 单调减小的D结构体序列, 该序列使得 $\delta = 0$; 如果 $\delta < 0$, 则一定存在一个使得 δ 单调增大的I结构体序列, 该序列使得 $\delta = 0$.

证明 如果 $\delta > 0$, 则由定理3可知, 一定存在D型结构体. 设由 $pfc_i \in D(i = 0, 1, \dots)$ 组成的序列为 $\{pfc_0, pfc_1, \dots\}$, 下面用数学归纳法证明.

当 $i = 0$ 时, pfc₀在Rev运算前后图像的统计值是 δ 和 δ_0 . 由定理2得, $\delta > \delta_0$. 假设 $i = n - 1$ 时命题成立, 即 $\delta > \delta_0 > \delta_1 > \dots > \delta_{n-1}$.

当 $i = n$ 时, pfc_n进行Rev运算前后图像的统计值为 δ_{n-1} 和 δ_n . 由定理2可得, $\delta_{n-1} > \delta_n$, 所以 $\delta > \delta_0 > \delta_1 > \dots > \delta_{n-1} > \delta_n$ 也成立. 序列 $\{pfc_0, pfc_1, \dots\}$ 能使 δ 单调减少, 最终统计值 $\delta = 0$.

同理可证, 当 $\delta < 0$ 时, 在Rev运算下, 一定存在使 δ 单调增大的I结构体序列, 使得统计值 $\delta = 0$. \square

4 ALRS算法实现

4.1 ALRS算法系统模型

ALRS算法的系统模型如图3所示, 由嵌入算法部分和提取算法部分组成. 嵌入算法主要由在嵌入部分嵌入秘密信息和在修复部分修复统计性质组成; 提取算法部分只有提取秘密信息的过程. 嵌入算法与提取算法是不对称的, 与已知对称的信息隐藏算法有所区别. 因此, ALRS算法的安全性得到增强.

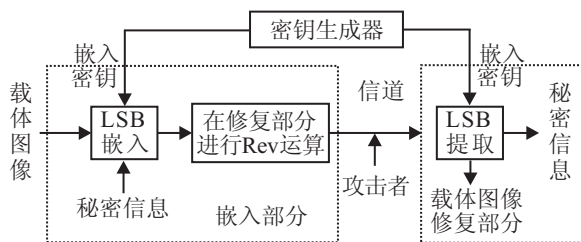


图3 ALRS算法系统模型

4.2 嵌入算法

嵌入算法流程如图4所示,其步骤如下.

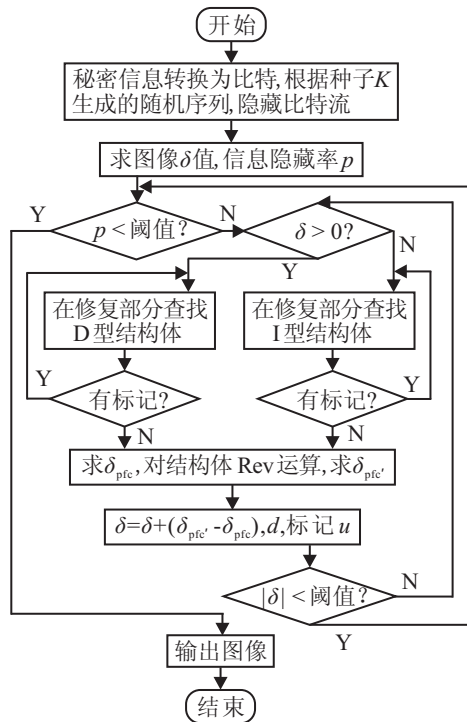


图4 ALRS 嵌入算法流程

1) 选择载体图像 C , 设图像是 $M \times N$. 将秘密信息转换成比特流, 设其长度为 L . 使用通信双方共享随机数发生器的嵌入密钥 K , 生成一个随机序列 k_i , $0 \leq i \leq L-1$, 秘密消息随机地扩散到秘密载体图像中. 信息嵌入位置如下:

$$\text{Loc}(M_i, N_j) = \begin{cases} \text{Loc}(M_0, N_0), & i = 0, j = 0; \\ \text{Loc}(M_i, N_j), & 0 < i \leq M-1, \\ & 0 < j \leq N-1. \end{cases}$$

其中: $M_0 = \text{int}(k_0/N) + 1, N_0 = k_0 \bmod N, M_i = M_{i-1} + \text{int}((k_i + N_{j-1})/N), N_j = (k_j + N_{j-1}) \bmod N, 0 \leq l \leq L-1, \text{int}(r)$ 表示取 r 整数部分, $r \bmod f$ 表示 r 模 f 取余数.

2) 通过式(3)求 δ , 通过式(1)或(2)求 p .

- ① 如果 p 大于或等于阈值, 则转步3);
- ② 如果 p 小于阈值, 则转步6).

3) 如果 $\delta > 0$, 则在修复部分查找D型 pfc. 若 pfc 没有被标记, 则由式(4)求 δ_{pfc} , 对 pfc 进行 Rev 运算, 得到 pfc' , 再由式(5)求 $\delta_{\text{pfc}'}$; 如果被标记, 则重新查找.

如果 $\delta < 0$, 则在修复部分查找I型 pfc. 若 pfc 没有被标记, 则由式(4)求 δ_{pfc} , 对 pfc 进行 Rev 运算, 得到 pfc' , 再由式(5)求 $\delta_{\text{pfc}'}$; 如果被标记, 则重新查找.

- 4) 计算 $\delta = \delta + (\delta_{\text{pfc}'} - \delta_{\text{pfc}})$, 标记中心元 u .
- 5) 如果 $|\delta| < \text{阈值}$, 则转步2); 否则, 转步3).
- 6) 输出载密的图像 M , 结束.

4.3 提取算法

提取算法是提取秘密信息的一个过程.

根据双方共享随机数发生器的嵌入密钥 K , 生成相应的随机序列 $k_i, 0 \leq i \leq L-1$, 并根据随机序列, 找到嵌入信息的具体位置, 提取 LSB 位信息, 组成比特流, 最后恢复秘密信息.

4.4 时间复杂度分析

下面计算嵌入算法的时间复杂度.

嵌入算法执行步1)所需的最坏时间复杂度为 $O(m \times n)$; 执行步2)所需最坏时间复杂度为 $O(4m \times n)$; 执行步3)所需最坏时间复杂度为 $O(4m \times n)$; 执行步4)所需最坏时间复杂度为 $O(m \times n)$; 执行步5)所需最坏时间复杂度为 $O(m \times n)$; 执行步6)所需最坏时间复杂度为 $O(m \times n)$.

提取算法的时间复杂度: 执行所需的最坏时间复杂度为 $O(m \times n)$.

ALRS算法总的时间复杂度为 $O(n^2)$, 低于DCLS算法的时间复杂度 $O(n^4)$.

5 实验结果与分析

实验工具采用 Matlab, 实验的图像来自文献[11], Internet 和数码相机图像等. 随机选取200幅图像作为实验图库. ALRS算法的实验成功效率为100%, 其结果表明了ALRS算法的有效性和普适性.

图5给出了从实验图库中随机选择一幅图像的嵌入与修复效果图. 其中: 图5(a)为原始图像, 图5(b)为秘密图像, 图5(c)为LSB方法嵌入后的载密图像, 图5(d)为ALRS载密图像, 信息的嵌入率为80%.



图5 一幅图像的嵌入与修复的效果图

由图5可见, 在显示效果上, ALRS 载密图像与原始图像和LSB载密图像看不出区别.

实验1 对图5所示图像进行LSB信息隐藏, 计算 δ ; 然后在嵌入部分查找D型和I型结构体, 并计算 δ_D 和 δ_I . 计算结果如表1所示. 实验结果表明, $-\delta_I \leq \delta \leq \delta_D$, ALRS算法能够恢复图像像素的统计性质.

表1 载密图像的 δ , δ_I 和 δ_D

实际 p	δ	δ_I	δ_D	$-\delta_I \leq \delta \leq \delta_D$
0	-712	81 838	66 352	yes
10	3 828	71 444	59 382	yes
50	6 042	39 766	36 248	yes
80	14 124	15 616	14 482	yes

实验2 利用SPA方法对LSB嵌入, DCLS和ALRS三种隐藏方法进行分析并估计 p 的值. 表2给出了SPA方法对这3种隐藏方法攻击和估计 p 的值, 其中 T 为 δ 的阈值.

表2 对LSB嵌入, DCLS和ALRS的分析结果

实际 p	p 估计			T
	LSB嵌入	DCLS	ALRS	
0	0.69	0.69	0.69	无
3	3.07	0.01	0	4
5	4.95	0.02	0	4
10	10.27	0.03	0	4
20	20.13	0.04	0.01	4
30	29.94	0.04	0.01	4
40	40.30	0.06	0.01	4
50	50.35	0.06	0.01	4
60	60.37	0.06	0.01	4
70	70.10	0.09	0.03	4
80	79.01	0.10	0.04	4

实验结果表明, ALRS算法能够抵抗SPA方法攻击; ALRS算法优于DCLS算法. 通过修改ALRS嵌入算法中 δ 的阈值 T , 可以任意修改SPA方法对载密图像中信息嵌入量 p 的估计结果. 在嵌入率达到80%的情况下, 也能成功抵抗SPA方法攻击. 因此, ALRS算法更灵活, 更容易实现.

6 结 论

通过分析DCLS等方法的不足, 结合SPA方法的特点, 本文提出了ALRS信息隐藏算法. 该算法通过分析相邻像素结构体的性质, 找到一个单调的修复图像的统计特性相邻像素结构体序列. 实验结果表明, 该序列能够成功修复载密图像统计性质, 有效抵抗SPA攻击. 该算法可以在多项式时间复杂度下完成. 由于嵌入算法与提取算法不是一个完全逆过程, 这便增加了算法的安全性. 系统密钥将通过一个安全的信道传递. 后续的工作将进一步对其他格式图像性质进行研究.

参考文献(References)

- [1] Huang Fangjun, Huang Jiwu. Calibration based universal JPEG steganalysis[J]. Science in China Series F: Information Sciences, 2009, 52(2): 260-268.
- [2] Westfeld A. Detecting low embedding rates[C]. Proc of the 5th Int Workshop on Information Hiding. Berlin: Springer-Verlag, 2002: 324-339.
- [3] Fridrich J, Goljan M, Du R. Detecting LSB steganography in color and grayscale images[J]. IEEE Trans on Multimedia, 2001, 8(4): 22-28.
- [4] Sorina Dumitrescu, Wu X L, Wang Z. Detection of LSB steganography via sample pair analysis[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2003, 51(7): 1995-2007.
- [5] 罗向阳, 高山青, 刘斌, 等. 一种可抵御RS统计分析的图像信息隐藏方案[J]. 控制与决策, 2007, 22(4): 423-435. (Luo X Y, Gao S Q, Liu B, et al. An image steganography scheme resisting RS statistical analysis[J]. Control and Decision, 2007, 22(4): 423-435.)
- [6] Yu Jeong Jae, Han Jae Won, Lee Kwang Su, et al. A secure steganographic scheme against statistical analyses[C]. Proc of the Int Workshop on Digital Watermarking. Berlin: Springer-Verlag, 2004: 497-507.
- [7] Luo X Y, Liu B, Liu F L. A dynamic compensation of LSB steganography resisting RS steganalysis[C]. Proc of the IEEE on Southeast Conf. Memphis, 2006: 244-249.
- [8] 罗向阳, 陆佩忠, 刘粉林. 一类可抵御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. (Luo X Y, Lu P Z, Liu F L. A dynamic compensation LSB steganography method defeating SPA[J]. Chinese J of Computers, 2007, 30(3): 463-473.)
- [9] 田源, 程义民, 谢于明, 等. 一种抗SPA分析的图像信息隐藏方法[J]. 中国科学技术大学学报, 2008, 38(12): 1376-1380. (Tian Y, Cheng Y M, Xie Y M, et al. Steganography scheme for images against SPA steganalysis[J]. J of University of Science and Technology of China, 2008, 38(12): 1376-1380.)
- [10] Rafael C Gonzalez, Richard E Woods, Steven L Eddins. Digital image processing using Matlab[M]. Beijing: Publishing House of Electronics, 2009.
- [11] Allan Weber. USC-SIPI image database[EB/OL]. [2009-10-22]. <http://sipi.usc.edu/services/database/database.html>.