

自适应阈值小波滤波复原在隐写分析中的应用

刘学谦,平西建,张涛

(信息工程大学 信息工程学院, 郑州 450002)

(jxdlxq@126.com)

摘要:将空域图像的数字隐写过程看作是一种被加性噪声污染的图像退化过程,从而引入图像复原技术来进行秘密消息的检测。将自适应阈值小波滤波应用于隐写分析,并结合图像滤波前后的差异性特征提出一种新的 LSB 匹配隐写分析方法。实验结果表明,该方法要优于 Ker 的校准法,尤其对未压缩的高精度原始图像的检测更为有效,并且不用估计嵌入率,方法简单,易于实现。

关键词:信息隐藏;图像退化/复原;LSB 匹配隐写分析;自适应阈值;小波滤波

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A

Application of adaptive thresholding wavelet filter restoration in steganalysis

LIU Xue-qian, PING Xi-jian, ZHANG Tao

(College of Information Engineering, Information Engineering University, Zhengzhou Henan 450002, China)

Abstract: When the steganography in spatial domain was modeled as an image degradation process caused by additive noise, the image restoration could be introduced for secret messages detecting. A new method of LSB matching steganalysis was proposed through using adaptive thresholding wavelet filter restoration in steganalysis and combine with the difference characters between the original image and the filtered one. Experimental results show that, the method is better than Ker's calibrating method, especially in detecting uncompressed high resolution raw image due to its simple realization without estimating the embedding rate beforehand.

Key words: information hiding; image degradation/restoration; LSB matching steganalysis; adaptive threshold; wavelet filter

0 引言

在当今这个多媒体技术和网络通信技术迅猛发展的信息爆炸时代,信息安全问题中信息隐藏技术的双刃剑作用日益突出。而隐写分析技术作为信息隐藏检测主要分支之一,更是受到研究者的高度重视。

空域图像最不重要位(Least Significant Bit, LSB)数字隐写由于其算法简单、数据隐藏量大而被广泛应用。其中的 LSB 匹配法克服了图像直方图的值对现象,导致检测难度明显增加,从而成为当前隐写分析的一个难点和热点。近年来,研究者从秘密信息的嵌入过程着手进行 LSB 匹配隐写分析研究。文献[1]把信息隐藏过程建模为加性高斯噪声的叠加过程,选择图像直方图特征函数重心作为特征来区分载体和载密图像。文献[2]在 Harmsen 的基础上对图像进行校准以得到对原图特征的估计。文献[3]提出了基于维纳滤波改进的 LSB 匹配隐写分析算法。

同时,未压缩的高精度原始图像由于含有丰富的随机噪声,其像素间的相关性变得很弱,导致基于图像 LSB 序列随机性度量的隐写分析方法性能大幅度下降。于是继低嵌入率隐写分析之后,未压缩的高精度原始图像的隐写分析成为 LSB 匹配隐写分析的又一大难点。

本文将数字隐写中秘密信息的嵌入过程看作是一种加性噪声对“干净”载体图像的污染,从而引入图像复原技术重建

载体图像。本文将自适应阈值小波滤波应用于隐写分析,并且将待检测图像的滤波复原结果作为载体图像的估计,结合图像滤波前后直方图/邻接直方图特征函数质心差异性特征,设计了一种不仅对经过 JPEG 压缩的图像能够进行有效检测,而且对未压缩的高精度原始图像也具有一定检测能力的 LSB 匹配隐写分析方法。

1 图像退化/复原与 LSB 匹配

1.1 图像退化/复原

图像退化即图像受到一定的系统或噪声影响后所产生的质量退化现象。图像退化可以被模型化为一个退化函数 $h(i, j)$ 和一个加性噪声项 $f(i, j)$, 一幅图像 $x(i, j)$ 经退化系统后产生退化图像 $y(i, j)$ 。图像退化过程可用式(1)表示。

$$y(i, j) = h(i, j) * x(i, j) + f(i, j) \quad (1)$$

图像复原即利用退化现象的某种先验知识来重建或复原被退化的图像。图像复原技术即通过对式(1)的逆运算获得原始图像的近似估计 $\hat{x}(i, j)$, 它通常是在一定最佳准则下对所求期望结果的最佳估计。图像退化/复原过程如图1所示。

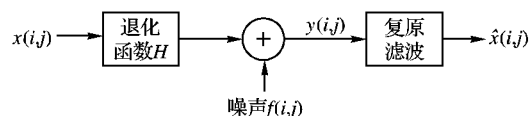


图1 图像退化/复原过程模型

收稿日期:2008-12-29;修回日期:2009-03-20。 基金项目:国家自然科学基金资助项目(60473022)。

作者简介:刘学谦(1984-),男,硕士研究生,主要研究方向:图像分析与处理、模式识别、信息隐藏;平西建(1953-),男,河南新乡人,教授,博士生导师,主要研究方向:图像分析与处理、模式识别、信息隐藏;张涛(1977-),男,湖北天门人,副教授,博士,主要研究方向:图像分析与处理、模式识别、信息隐藏。

1.2 LSB 匹配数字隐写/隐写分析

LSB 匹配又叫 ± 1 嵌入法,即当秘密信息比特与载体图像的 LSB 相同时不做改动,否则将像素值随机加 1 或者减 1。

如图 2 所示,对于空域图像的 LSB 匹配数字隐写过程,载体图像 $x(i,j)$ 嵌入秘密消息 $f(i,j)$ 后生成载密图像 $y(i,j)$ 。与图 1 中图像退化过程相比较,此时退化函数 $h(i,j)$ 可以看作成一个单位阵,加性噪声 $f(i,j)$ 可以看作成一个具有如式(2)所示概率密度分布的函数。

$$p(f(i,j)) = \begin{cases} \frac{r}{4}, & f(i,j) = 1 \\ \frac{r}{4}, & f(i,j) = -1 \\ 1 - \frac{r}{2}, & f(i,j) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

其中 r 为秘密消息嵌入率 ($0 \leq r \leq 1$)。由式(2)可知, $f(i,j)$ 的数学期望为 0, 方差为 $r/2$ 。

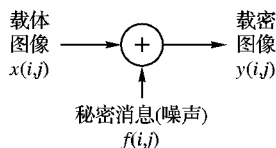


图2 LSB 匹配隐写过程模型

于是式(1)可简化为:

$$y(i,j) = x(i,j) + f(i,j) \quad (3)$$

LSB 匹配隐写退化过程具有以下特点:

- 1) $f(i,j)$ 是序列中各元素独立同分布的随机序列;
- 2) $f(i,j)$ 是幅度为 1 的弱噪声,引起的图像退化程度很小;
- 3) $f(i,j)$ 的分布特点已知,但是噪声方差由秘密信息嵌入率决定。

对于隐写分析者而言, $x(i,j)$ 是未知的,估计并重建 $x(i,j)$ 可以为隐写分析提供新的解决途径。由于 $y(i,j)$ 是通过将秘密信息嵌入 $x(i,j)$ 而生成,相对 $x(i,j)$ 而言, $y(i,j)$ 以某种方式和程度发生了质量退化。定义 $z(i,j)$ 为待检测图像, $z(i,j)$ 可取 $x(i,j)$ 或者 $y(i,j)$ 。本文将 $y(i,j)$ 看作是 $x(i,j)$ 的一个质量退化样本,首先引入图像复原技术对 $z(i,j)$ 进行滤波复原,得到的结果作为对载体图像 $x(i,j)$ 的估计 $\hat{x}(i,j)$ 。然后寻找对 LSB 匹配数字隐写嵌入过程敏感的特征向量,如果 $z(i,j)$ 是非载密的 ($x(i,j)$),则滤波复原过程对其产生的影响很小,滤波前后特征向量基本没有变化;而如果 $z(i,j)$ 是载密的 ($y(i,j)$),则滤波复原过程对其具有较大的影响,滤波前后特征向量产生明显变化。最后根据特征向量的变化情况,得到隐写分析检测结果。

然而滤波复原与隐写分析的侧重点又有所不同,滤波复原主要关注复原后图像的视觉效果,而隐写分析更关心所得载体图像估计的精确程度。Ker 在文献[2]中提出的对图像进行校准操作的过程,实际上也可以看作是一种对图像进行 4:1 亚采样的图像滤波复原过程。

2 自适应阈值小波滤波

目前应用小波变换进行图像去噪的方法可以分为三类:基于信号奇异性的模极大值重构去噪方法,基于信号尺度间相关性的空域相关去噪方法和基于小波变换去相关性的小波

域阈值去噪方法(其中小波域阈值去噪法应用最为广泛)。

通用的阈值选取公式为 $\lambda_j = \delta \sqrt{2 \ln(M \times N)}$,这是在正态高斯噪声模型下,针对多维独立正态变量联合分布,在维数趋向无穷时研究得到的结论,是阈值优化的上界,而且没有考虑各尺度小波系数的特点。实际用于图像去噪中,其处理效果并不很好,本文选用文献[4]中的阈值:

$$\lambda_j = \frac{\delta \sqrt{2 \ln(M \times N)}}{\ln(j+1)} \quad (4)$$

其中 j 为尺度, δ 为噪声的标准差,这里取 Donodo 的估计 $\delta = \frac{\text{median}(|HH_1|)}{0.6745}$, HH_1 为小波分解后第一层的对角线高频信息。

3 差异性特征向量

3.1 直方图特征函数质心

将图像直方图函数记为 $h(n)$,定义载体和载密图像的直方图函数分别为 $h_x(n)$ 和 $h_y(n)$,定义噪声的取值集合函数 $f_\Delta(n)$ 为:

$$f_\Delta(n) = |\{(i,j) | y(i,j) - x(i,j) = n \pmod{N}\}| \quad (5)$$

其中 $x(i,j)$, $y(i,j)$ 分别是载体与载密图像在 (i,j) 处的灰度值。则噪声对图像直方图的影响可以用式(6)表示:

$$h_y(n) = h_x(n) * f_\Delta(n) \quad (6)$$

将图像直方图函数的离散付氏变换(DFT),称为直方图特征函数(Histogram Characteristic Function, HCF),记为 $H[k]$ 。定义载体和载密图像的直方图特征函数分别为 $H_x[k]$ 和 $H_y[k]$,由式(8)可得:

$$H_y[k] = H_x[k] F_\Delta[k] \quad (7)$$

其中 $F_\Delta[k]$ 是 $f_\Delta[n]$ 的傅氏变换。对于 LSB 匹配数字隐写过程,加性噪声的分布为 $f_\Delta[0] = 0.5$, $f_\Delta[1] = 0.25$ 和 $f_\Delta[-1] = 0.25$,于是 $F_\Delta[k] = \cos^2(\pi k/N)$,由于 $F_\Delta[k]$ 始终小于 1,所以 $H_y[k]$ 始终小于 $H_x[k]$ 。

HCF 的质心(Center Of Mass, COM)记为 $C(H[k])$,以下简称 HCF-COM,定义如下:

$$C(H[k]) \triangleq \frac{\sum_{i=0}^{\frac{N}{2}-1} i |H[i]|}{\sum_{i=0}^{\frac{N}{2}-1} |H[i]|}; \quad N \text{ 为 DFT 长度} \quad (8)$$

LSB 数字隐写过程相当于对载体图像进行了低通滤波,使得图像直方图趋于平滑,其 HCF-COM 在隐写后有所减小。本文将待检测图像的滤波结果看作是对载体图像的估计,如果待检测图像为载体图像,则滤波前和滤波后的 HCF-COM 将基本保持不变,如果待检测图像为载密图像,则滤波后的 HCF-COM 将有所增加。即:

$$C(H'_x[k]) \approx C(H_x[k]) \quad (9)$$

$$C(H'_y[k]) > C(H_y[k]) \quad (10)$$

其中 $H'[\cdot]$ 表示图像经滤波复原后的 HCF。

3.2 邻接直方图特征函数质心

将图像邻接直方图函数记为 $h^2(m,n)$, $h^2(m,n)$ 是一个矩阵,表示图像中前一个像素值为 m 且后一个像素值为 n 的

相邻像素对出现的个数。与直方图类似地, LSB 匹配数字隐写过程在邻接直方图中也产生平滑现象。

将图像邻接直方图函数的 2 维离散付氏变换(2-DFT), 称为邻接直方图特征函数(AHCF), 记为 $H^2[k, l]$, 则 AHCF 的质心记为 $C^2(H^2[k, l])$, 以下简称 AHCF-COM, 定义如下:

$$C^2(H^2[k, l]) \triangleq \frac{\sum_{i,j=0}^{\frac{N}{2}-1} (i+j) |H^2[i, j]|}{\sum_{i,j=0}^{\frac{N}{2}-1} |H^2[i, j]|} \quad (11)$$

其中 N 为 2-DFT 变换长度。类似地, LSB 数字隐写过程造成载体图像的 HCF-COM 在隐写后有所减小, 同理可得:

$$C^2(H_c^2[k, l]) \approx C^2(H^2[k, l]) \quad (12)$$

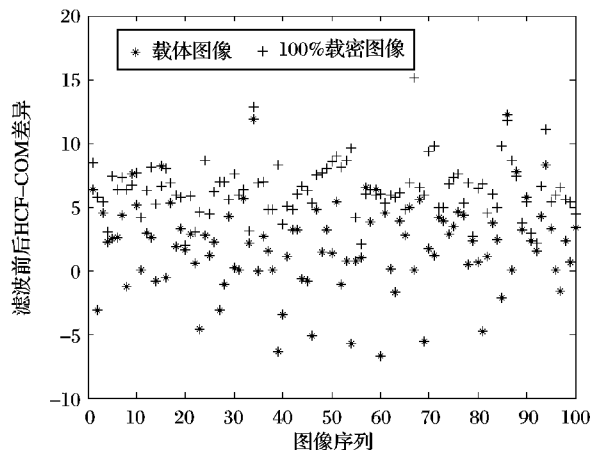
$$C^2(H_s^2[k, l]) > C^2(H^2[k, l]) \quad (13)$$

其中 $H^2[\cdot]$ 表示图像经滤波复原后的 AHCF。

3.3 构造差异性特征向量

根据载体图像和载密图像在滤波前后的上述变化特点, 构造用于本文 LSB 匹配隐写分析的差异性特征向量 (f_1, f_2) , 其中:

$$f_1 = C(H'[k]) - C(H[k]) \quad (14)$$



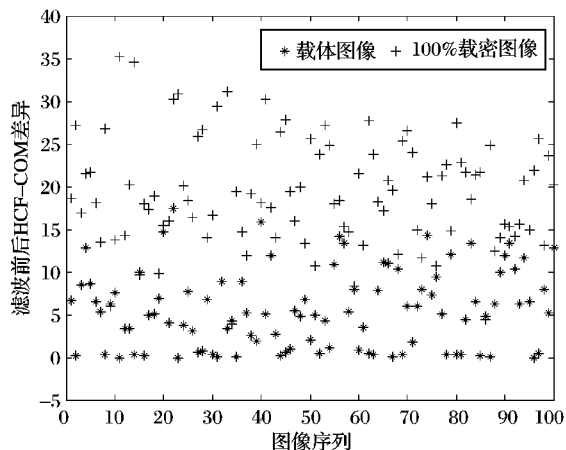
(a)载体与100%载密图像 f_1 比较图

$$f_2 = C^2(H^2[k, l]) - C^2(H^2[k, l]) \quad (15)$$

从 CBIR 图像库^[5] 和 NRCS 图像库^[6] 中分别随机选择 100 幅图像, 用标准算法转换为灰度 BMP 图像, 组成载体图像库。再以随机位置 LSB 匹配法对载体图像嵌入 100% 容量的随机序列, 组成 100% 载密图像库。用本文提出的基于自适应阈值小波滤波法分别对这两个图像库进行滤波复原, 并计算各自的差异性特征向量 (f_1, f_2) 并作出比较, 实验结果如图 3、4 所示。

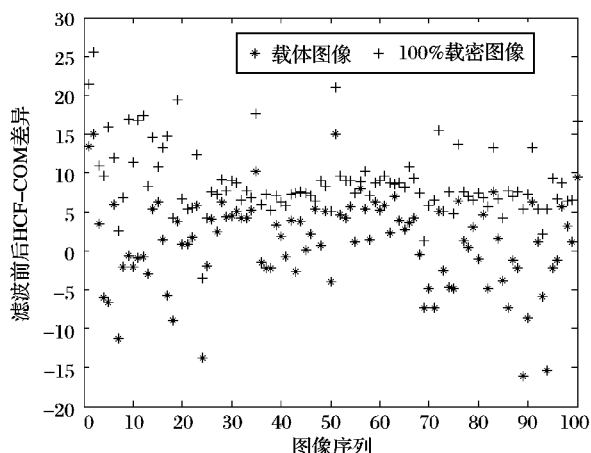
从图 3 可见, 实验结果与式(9)、(10)、(12)、(13)完全相符。同时由于 CBIR 图像库中的图像都是 JPEG 格式的, 量化过程基本滤除了高频随机噪声, 当转换成 BMP 格式的图像之后像素间的相关性较强, 而秘密信息经过加密或置乱后近似于随机噪声, 嵌入以后像素间的相关性明显减弱, 从而导致式(15)中 f_2 的值较大。

从图 4 可见, 实验结果与式(9)、(10)、(12)、(13)基本相符。同时由于 NRCS 图像库中的图像都是高精度 TIFF 格式的, 未经过有损压缩, 保留了大量的随机噪声, 当转换成 BMP 格式的图像之后像素间的相关性较弱, 故式(15)中 f_2 的值也较小, 使得载体图像与载密图像的差异特征向量 (f_1, f_2) 的分类效果不如图 3 的 CBIR 库。

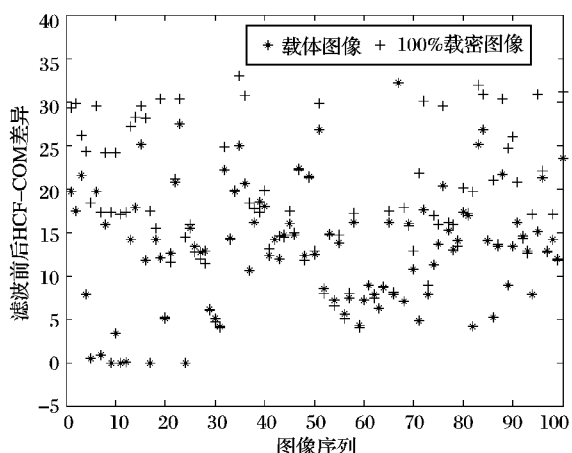


(b)载体与100%载密图像 f_2 比较图

图3 本文滤波算法对 CBIR 库载体、100% 载密图像 (f_1, f_2) 比较图



(a)载体与100%载密图像 f_1 比较图



(b)载体与100%载密图像 f_2 比较图

图4 本文滤波算法对 NRCS 库载体、100% 载密图像 (f_1, f_2) 比较图

4 实验仿真与结果分析

首先从 CBIR 图像库中随机选择 800 幅图像, 用标准算法转换为灰度 BMP 图像, 组成载体图像库。再以随机位置 LSB

匹配法对载体图像分别嵌入 10% ~ 100% 容量的随机序列, 组成 10% ~ 100% 载密图像库。在虚警率为 5% 的条件下, 用本文提出的隐写分析方法和 Ker 提出的校准法分别对这 11 个图像库进行检测实验, 其中 500 幅用于训练, 300 幅用于测

试。比较结果如图 5 所示,图中 AUC 为曲线下面积 (Area Under Curve)。由于在嵌入率为 50% 时本文方法与 Ker 的校准法相比优势最大,而嵌入率为 100% 时优势最小 (基本相等),因此从上面的 11 个图像库中选择嵌入率为 50% 和 100% 的两个载密图像库为代表,绘制本文方法和 Ker 校准法的 ROC 曲线进行对比分析,比较结果如图 6 所示。

从图 5、6 可以看出,本文方法的效果要优于 Ker 的校准法。为了使其 ROC 曲线比较更为明显直观,图 7 中虚警率取 0 ~ 10%。在载密图像嵌入率分别为 50% 与 100% 时,取检出率 (True Positive, TP) 值为 50% 与 80%, 可得本文方法和 Ker 校准法的虚警率 (False Positive, FP) 值如表 1、2 所示。

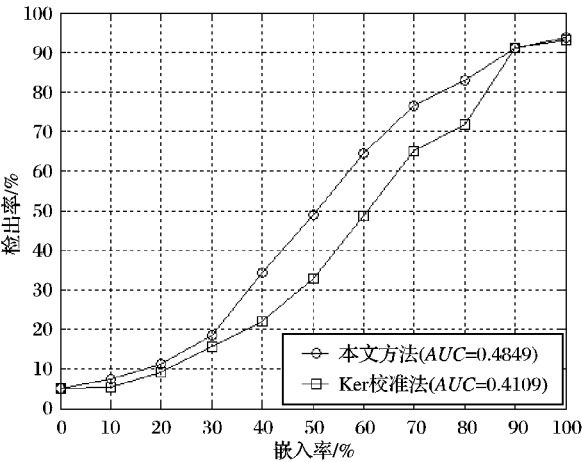


图 5 对不同嵌入率图像的检测结果图 (虚警率为 5%)

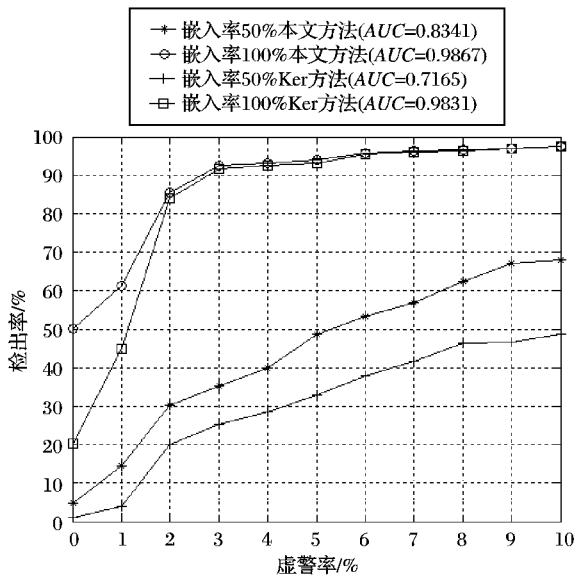


图 6 检测性能 ROC 曲线图 (载密图像嵌入率分别为 50% 与 100%)

表 1 载密图像嵌入率为 50% 时 FP 值

TP 值	Ker 校准法/%	本文方法/%
50%	11.2	5.4
80%	78.0	20.2

表 2 载密图像嵌入率为 100% 时的 FP 值

TP 值	Ker 校准法/%	本文方法/%
50%	1.0	0.0
80%	1.8	1.6

然后从 NRCS 图像库中随机选择 3 000 幅图像,用标准算法转换为 500 × 700 灰度 BMP 图像,组成载体图像库。再以

随机位置 LSB 匹配法对载体图像分别嵌入 10% ~ 100% 容量的随机序列,组成 10% ~ 100% 载密图像库。在虚警率为 5% 的条件下,用本文提出的隐写分析方法和 Ker 提出的校准法分别对这 11 个图像库进行检测实验,其中 2 000 幅用于训练,1 000 幅用于测试。比较结果如图 7 所示。由于在嵌入率为 80% 时本文方法与 Ker 的校准法相比优势最大,而嵌入率为 60% 时优势最小,因此从上面的 11 个图像库中选择嵌入率为 80% 和 60% 的两个载密图像库为代表,绘制本文方法和 Ker 校准法的 ROC (Receiver Operation Curve) 曲线进行对比分析,比较结果如图 8 所示。

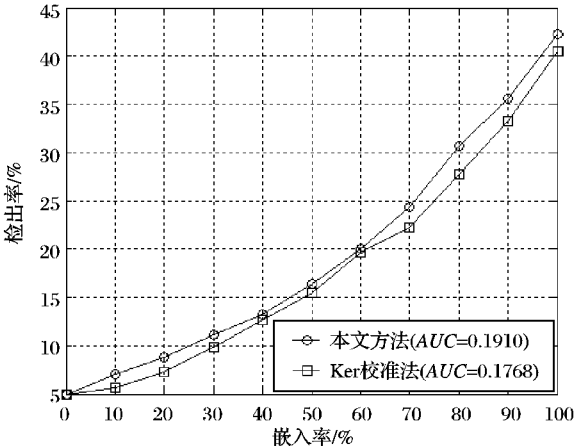


图 7 对不同嵌入率图像的检测结果图 (虚警率为 5%)

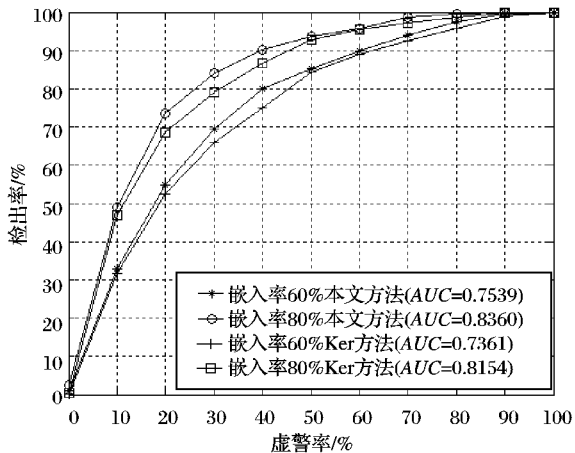


图 8 检测性能 ROC 曲线图 (载密图像嵌入率分别为 60% 与 80%)

在载密图像嵌入率分别为 60% 与 80% 时,取检出率 TP 值为 50% 与 80%, 可得本文方法和 Ker 校准法的虚警率 FP 值如表 3、4 所示。

表 3 载密图像嵌入率为 60% 时的 FP 值

TP 值	Ker 校准法/%	本文方法/%
50%	18.0	17.6
80%	45.2	39.9

表 4 载密图像嵌入率为 80% 时的 FP 值

TP 值	Ker 校准法/%	本文方法/%
50%	11.1	10.6
80%	30.5	25.3

从图 7、8 和表 3、4 可以看出,本文方法的效果要优于 Ker 的校准法,但优势并不是很大,从而证明了本文方法对未压缩的高精度原始图像也具有一定检测能力。

(下转第 1639 页)

达 F , $ABEF$ 就是其中之一,它标注了请求信息从请求方到资源方的一条链状轨迹,这样的链状轨迹称为信任链。 ACF 、 ADF 、 BCF 等都是图3(d)中存在的信任链。

信任链不仅给出了请求方到资源方的路径信息,还记录了沿途收集到的信任关系,如信任链 $ABEF$ 。

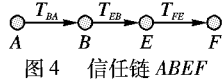


图4 信任链 $ABEF$

图4中: B 、 E 是信任链沿途经过的信任代理, T_{BA} 、 T_{EB} 、 T_{FE} 是信任代理之间信任关系的具体表达,即信任向量。

同一个资源请求,经历了不同的路径,形成了不同的信任链,收集了不同的信任关系,每条信任链都代表了不同的节点对请求方的信任评价,资源方正是根据这些不同的评价综合计算出请求方的信任等级,以此作为决策的依据。

信任链中有可能存在回路,如图5所示,这是一个信任追溯的过程图,其中 BDC 构成了环路,请求信息将永远在 BDC 之间循环发送。

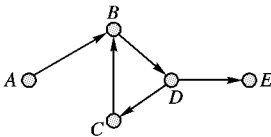


图5 信任链环路

为了避免信任链环路的出现,每个信任代理应判断到达的信任链是否已经经过自身,如果经过,则应将该信任链丢弃以避免环路的形成。

2.2.2 请求时间过长

如图6所示,信任链 $ABCDEH$ 可能需要经过很长时间才能到达最终的资源方 H ,在此之前,信任链 AFH 、 AGH 可能早已到达,那么 H 没有必要持续等待信任链 $ABCDEH$ 。过晚的信任链已经失去参考价值。

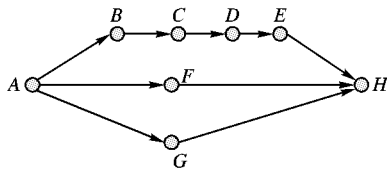


图6 $ABCDEH$ 请求时间过长

为了解决该问题,资源方在接到第一条信任链时,启动计时,设置必要的等待时间,超过该时间到达的所有同类信任链全部丢弃。同时,为了唯一区分信任链所属的访问请求,每个

访问请求生成一个随机序列,由请求方生成,包含在该请求所属的所有信任链中,资源方以此判断信任链的类别。

3 结语

信任评估与信任追溯是信任管理中两个重要的组成部分。信任评估是信任研究的基础,合理的、有效的信任评估机制是基于信任的安全机制的核心和引擎。本文介绍了一种基于模糊数学的信任评估模型,并对其进行了完善,将时间因素引入到该模型中,使其更符合实际应用。本文还根据信任关系发现已有的研究成果,提出了分布式信任追溯算法,其将追溯过程中的复杂操作分散到各个节点上,有效避免了访问控制中效率瓶颈的产生。

参考文献:

- [1] FOSTER I, KESSELMAN C, TUECKE S. The anatomy of the grid: Enabling scalable virtual organizations [C]// International Journal Supercomputing Applications, 2001, 15(3): 200 - 222.
- [2] ABADI M, BURROWS M, LAMPSON B. A calculus for access control in distributed systems [J]. ACM Transactions on Programming Languages and Systems, 1993, 15(4): 706 - 734.
- [3] BLAZE M, FEIGENBAUM J, LACY J. Decentralized trust management [EB/OL]. [2008 - 10 - 10]. <http://www.cs.utsa.edu/~winsboro/teaching/CS6463-S06/Papers/BFL96.pdf>.
- [4] CHANDER A, DEAN D, MITCHELL J C. A state-transition model of trust management and access control [C]// CSFW'01: Proceedings of 14th IEEE Computer Security Foundations Workshop. Cape Breton, Nova Scotia, Canada: IEEE Press, 2001: 27 - 43.
- [5] 唐文, 胡建斌, 陈钟. 基于模糊逻辑的主观信任管理模型研究 [J]. 计算机研究与发展, 2005, 42(10): 1654 - 1659.
- [6] JOSANG A, HAYWARD R, POPE S. Trust network analysis with subjective logic [C]// Proceedings of the Australasian Computer Science Conference: ACSC06. Hobart, Australia: Australian Computer Society, 2006: 85 - 94.
- [7] 赵莹. 面向访问控制的信任评估研究与实现 [D]. 北京: 北京航空航天大学, 2006.
- [8] AZZEDIN F, MAHESWARAN M. Evolving and managing trust in grid computing systems [C]// CCECE'02: IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Winnipeg: IEEE Press, 2002: 1424 - 1429.
- [9] HUYNH T D, JENNINGS N R, SHADBOLT N. On handling inaccurate witness reports [C]// Proceedings of 8th International Workshop on Trust in Agent Societies. Utrecht, Netherlands: [s. n.], 2005: 63 - 77.

(上接第1635页)

5 结语

LSB 匹配数字隐写是隐写分析中的难点问题,尤其是对未压缩的高精度原始图像的检测。本文将空域图像的数字隐写过程看作是一种被加性噪声污染的图像退化过程,把自适应阈值小波滤波应用于 LSB 匹配隐写分析,并且结合图像滤波前后直方图/邻接直方图特征函数质心差异性特征,设计了一种不仅对经过 JPEG 压缩过的图像能够进行有效检测,而且对未压缩的高精度原始图像也具有一定检测能力的 LSB 匹配隐写分析方法。实验结果表明,本文所提出的方法在性能上要优于 Ker 的校准法,尤其对未压缩的高精度原始图像的检测更为有效。与文献[3]相比,克服了事先假定嵌入率得到噪声方差所带来的性能影响,方法简单,易于实现。

参考文献:

- [1] HARMSSEN J J, PEARLMAN W A. Steganalysis of additive noise modelable information hiding [EB/OL]. [2008 - 10 - 10]. http://www.cipr.rpi.edu/~harnsj/pubs/harmsen_ms.pdf.
- [2] KER A D. Steganalysis of LSB matching in grayscale images [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2005, 12(6): 441 - 444.
- [3] 王国新. LSB 匹配隐写分析和隐藏信息盲检测技术研究 [D]. 郑州: 信息工程大学, 2007: 35 - 42.
- [4] 赵瑞珍, 宋国乡. 一种基于小波变换的白噪声消噪方法的改进 [J]. 西安电子科技大学学报, 2000, 27(5): 619 - 622.
- [5] University of Washington CBIR image database [DB/OL]. [2008 - 09 - 14]. <http://www.cs.washington.edu/research/magedatabase/roundtruth/>.
- [6] The USDA NRCS photo gallery [DB/OL]. [2008 - 09 - 14]. <http://photogallery.nrcs.usda.gov>.