

矢量图形中基于小波变换的盲水印算法*

李媛媛 许录平

(西安电子科技大学计算机网络与信息安全教育国家重点实验室,西安电子科技大学电子工程学院,西安 710071)

摘要 提出一种用于矢量图形的数字水印方法. 该方法将矢量图形中图元的顶点坐标有顺序地排成一维序列,通过离散小波变换将序列分解成不同空间和频率上的复值系数,并根据水印的大小与小波系数之间的关系把水印嵌入到小波系数的幅值中,系数的相位不变. 该算法在提取水印时不需要原始矢量图形. 实验证明该算法具有良好的不可见性和较强的鲁棒性.

关键词 矢量;小波变换;地理信息系统(GIS);版权保护

中图分类号 TP391 **文献标识码** A

0 引言

随着多媒体技术和网络技术的迅速发展和广泛应用,对多媒体产品的版权保护已成为迫切需要解决的问题. 水印技术是一种防伪认证技术,它源于信息隐藏技术. 当传统的信息加密技术不能解决问题时,水印嵌入技术在这方面就显示出巨大的潜力. 成功的水印算法一般应满足以下的要求^[1]:1)不可感知性;2)鲁棒性;3)安全性.

大部分的二维图像可分成栅格图像和矢量图像两大类. 与栅格图像相比,矢量图是由一些几何图元表示的,它有以下优点:数据量小、精度高、交互性好;与分辨率无关,可以任意地放大、缩小而不失真;在编辑其中的某个对象时不会影响其他的对象,且对象间可以互相覆盖而不互相影响. 现在大部分数字地图产品采用的都是矢量格式,尤其是GIS的发展以及数字地球研究的兴起,使得对矢量图的版权保护尤为重要.

目前国内外有关在矢量图中嵌入水印的文献比较少. 文献[2]将矢量图按照顶点个数分成密度均匀的子块,把水印嵌入到子块图像的顶点中,这种算

法属于空域的算法. 文献[3]从矢量图中提取出顶点坐标,进行一维 DFT 变换,将水印嵌入到 DFT 变换的幅值系数中,结果会引起矢量图顶点轻微的失真. 上述算法在提取水印时均需要原矢量图的数据.

1 本文算法简介

根据文献[4],本文提出了一种在二维矢量图中嵌入盲水印的算法. 与文献[4]不同的是,本文将盲水印算法运用在矢量图形中,使得矢量图形的水印检测更为方便可靠. 设 V 表示一幅待嵌入水印的矢量图, V' 表示嵌入水印后的矢量图, \bar{V} 表示待提取水印的矢量图, W_k 是二值水印序列. 水印嵌入的方法如图 1. 首先,从 V 中顺序提取出所有顶点,进行排序,并进行延拓,使其满足离散小波变换的条件,同时为了提高水印的隐蔽性,对水印序列进行伪随机排序;其次,对延拓的顶点序列进行一维离散小波变换,并根据伪随机排序后水印值和小波系数的邻域平均值之间的关系来嵌入水印. 为了保持小波系数邻域平均值的不变性,要将水印隔点嵌入到系数中;最后进行小波反变换,去掉延拓的顶点,得到嵌入水印的矢量图 V' .

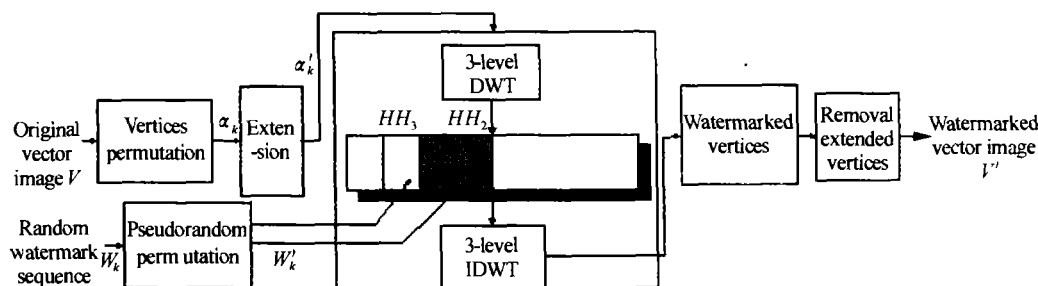


图1 水印嵌入方案
Fig. 1 Watermarking embedding scheme

2 矢量图中水印的嵌入

2.1 顶点提取及延拓

从矢量图 V 中顺序提取出所有顶点, N 表示顶

点的个数. 将顶点进行排序, 形成顶点序列 $\{V_k\}$, ($V_k = (x_k, y_k)$, V_k 为顶点坐标), 并由式(1)产生一个复数序列 $\{a_k\}$

$$a_k = x_k + iy_k \quad (k=0, \dots, N-1) \quad (1)$$

由于顶点的个数可能不满足规范的 2^L , 其中 L 为顶点作离散小波变换的级数, 因此要将顶点进行最小范围延拓, 使其满足 2^L . 设增加的顶点个数为 $M = \min \{x | (N+x) \bmod 2^L = 0\}$ ($x=1, 2, \dots$) (2) 这样一共要做小波变换的顶点个数为 $N' = N + M$. 增加顶点的位置在图形顶点序列的最后, 增加顶点的值与顶点序列最后的值相同. 这样经过延拓后的顶点序列为 $\{a'_k\}$, 同样也可以由复数形式来表示

$$a'_k = x'_k + iy'_k \quad (k=0, \dots, N'-1) \quad (3)$$

2.2 水印的生成

设水印序列 $W_k = \pm 1$, ($k=0, \dots, \text{floor}(N'/2^{L+1}) - 1$), 长度为 $\text{floor}(N'/2^{L+1})$, 其中 floor 是指朝负无穷方向取整. 为了提高 W_k 的鲁棒性, 对其进行伪随机排序, 得到 W'_k .

2.3 嵌入位置的选取

对顶点序列 $\{a'_k\}$ 进行 L 级一维离散小波变换, 可以得到顶点序列的多分辨率表示: LL_L 和 HH_n , ($n=1 \dots L$), 其中 LL_L 表示近似分量, HH_n ($n=1 \dots L$) 表示细节分量. 本文取 $L=3$. 考虑到低频子序列 LL_3 包含了图形中的重要信息, 嵌入水印会导致图形质量的下降, 而将水印嵌入到高频子序列 HH_n , ($n=1 \dots 3$) 中, 水印的抗噪声能力不强, 因此本文采取折衷的办法, 将水印重复的嵌入到子序列 HH_3 和 HH_2 中.

2.4 确定水印与小波系数之间的关系

本文的算法参考了文献[5]和文献[4]的水印嵌入方法:

2.4.1 计算所选子序列中系数的模值和相位

所选的子序列为 HH_f , $f=2, 3$ (以下同), 它的系数的模值和相位为

$$Z'_{(1,v)} = \text{abs}(d'_{(1,v)}) \quad (v=1, 2, \dots, N'/2^f) \quad (4)$$

$$\theta'_{(1,v)} = \text{angle}(d'_{(1,v)}) \quad (v=1, 2, \dots, N'/2^f) \quad (5)$$

式中 $d'_{(1,v)}$ 表示离散小波变换子序列 HH_f 的系数值, v 的值以下同. 同时记录各个系数实数部分与虚数部分的符号, 记为 $\text{sign_real}'_{(1,v)}$ 和 $\text{sign_img}'_{(1,v)}$. 因为是对隔点的小波系数嵌入水印, 因此要求出隔点系数的邻域平均值, 此时除了边界系数外, 每个都有两个邻域的系数, 所以邻域平均值为

$$\bar{Z}'_{(1,v')} = \text{mean}(Z'_{(1,v'-1)}, Z'_{(1,v'+1)}) \quad (6)$$

式中 v' 是选出的隔点小波系数的坐标. 而对于边界系数则做循环对称扩展. 并将每个平均值进行加权

调整

$$\bar{Z}'_{(1,v')} = \alpha \cdot \overline{Z'_{(1,v')}} \quad (7)$$

式中 α 是加权系数.

2.4.2 计算特征序列

$$K'_{(1,v')} = \text{round}(Z'_{(1,v')} / \bar{Z}'_{(1,v')}) \quad (8)$$

式中, round 表示朝最近的整数取整.

2.4.3 根据水印值和特征序列的关系完成水印的重复嵌入

1) 当 $W' = 1$ 时

$$\begin{cases} Z'_{(1,v')} = K'_{(1,v')} \bar{Z}'_{(1,v')}; \text{mod}(K'_{(1,v')}, 2) = 1 \\ Z'_{(1,v')} = (K'_{(1,v')} - 7) \bar{Z}'_{(1,v')}; \text{mod}(K'_{(1,v')}, 2) = 0 \\ \quad \text{and } Z'_{(1,v')} \leq K'_{(1,v')} \bar{Z}'_{(1,v')} \\ Z'_{(1,v')} = (K'_{(1,v')} + 7) \bar{Z}'_{(1,v')}; \text{mod}(K'_{(1,v')}, 2) = 0 \\ \quad \text{and } Z'_{(1,v')} > K'_{(1,v')} \bar{Z}'_{(1,v')} \end{cases}$$

2) 当 $W' = 0$ 时

$$\begin{cases} Z'_{(1,v')} = K'_{(1,v')} \bar{Z}'_{(1,v')}; \text{mod}(K'_{(1,v')}, 2) = 0 \\ Z'_{(1,v')} = (K'_{(1,v')} - 7) \bar{Z}'_{(1,v')}; \text{mod}(K'_{(1,v')}, 2) = 1 \\ \quad \text{and } Z'_{(1,v')} \leq K'_{(1,v')} \bar{Z}'_{(1,v')} \\ Z'_{(1,v')} = (K'_{(1,v')} + 7) \bar{Z}'_{(1,v')}; \text{mod}(K'_{(1,v')}, 2) = 1 \\ \quad \text{and } Z'_{(1,v')} > K'_{(1,v')} \bar{Z}'_{(1,v')} \end{cases} \quad (9)$$

2.4.4 计算嵌入水印后的小波系数

根据修改后小波系数的模值与未改变的相位求出嵌入水印后的小波系数

$$d^f_{(1,v)} = \sqrt{Z'^f_{(1,v)} / (1 + \tan^2 \theta'_{(1,v)})} + i \cdot \tan \theta'_{(1,v)} \cdot \sqrt{Z'^f_{(1,v)} / (1 + \tan^2 \theta'_{(1,v)})} \quad (10)$$

其中实数部分与虚数部分的符号由记录下的序列 $\text{sign_real}'_{(1,v)}$ 和 $\text{sign_img}'_{(1,v)}$ 确定. 最后进行小波逆变换, 去掉延拓的顶点, 得到嵌入水印后的矢量图 V' .

3 矢量图中水印的提取与检测

提取水印是嵌入水印的逆过程. 本算法的提取

水印过程不需要原图. 首先对待检测的矢量图 \tilde{V} 的顶点做最小范围的延拓, 延拓方法同上, 形成顶点序列. 将延拓后的顶点序列进行三级小波变换, 提取出子序列 HH_3 和 HH_2 的系数. 然后按照嵌入水印的相关算法计算出 $\bar{Z}^*_{(1,v')}$ 和 $K^*_{(1,v')}$.

根据下列公式提取水印

$$W^* = \begin{cases} 1 & \text{mod}(K^*_{(1,v')}, 2) = 1 \\ 0 & \text{mod}(K^*_{(1,v')}, 2) = 0 \end{cases} \quad (11)$$

并进行反伪随机排序, 得到提取出的水印序列 W^* . 最后利用相似度来检测原始水印和提取水印的相似性

$$\text{sim}(W, W^*) = \frac{\sum_k (W_k \cdot W_k^*)}{\sqrt{\sum_k (W_k^*)^2}},$$

$$(k=0, \dots, \text{floor}(N/2^{L+1}) - 1) \quad (12)$$

如果相似度大于某一阈值 T , 则认为提取出的水印正确. T 的确定如下^[6]: 随机生成 3000 个长度与原水印长度相等的伪水印信号, 其中第 1500 为原始水印信号, 将这 3000 个随机伪水印信号与原始水印信号做相关检测, 如图 2. 结果表明随机生成的伪随机信号与正确的信号的最大相关值在 3.9 左右, 因此可将检测阈值定为 4.2.

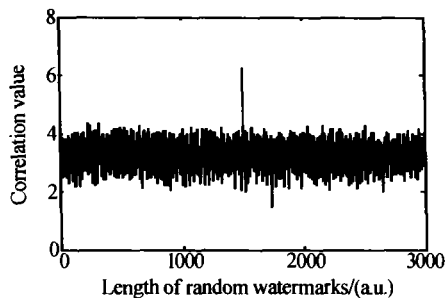


图 2 水印判决阈值得确定

Fig. 2 Watermark detection threshold setting

4 试验结果与性能分析

本文以顶点个数为 1169 的矢量图为例进行仿真试验. 试验中水印 $W_k = \pm 1$ 服从正态分布, 长度为 72, 对其进行伪随机排序得到 W'_k . 对矢量图形做三级小波分解. 原始矢量图形见图 3(a), 嵌入水印后的矢量图形见图 3(b), 相似度 $\text{sim}(W, W^*) = 6.3246$, 从试验结果可以看出两幅图形没有视觉差别.

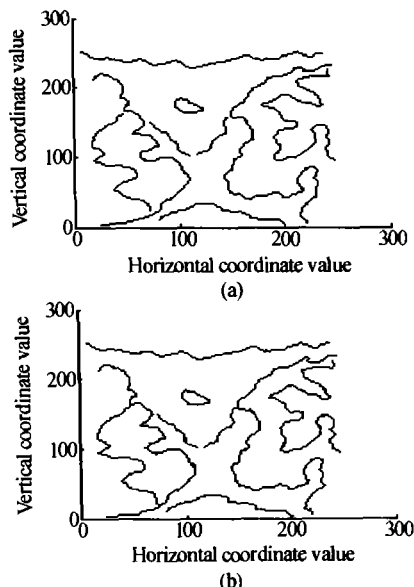


图 3 (a) 原始矢量图, (b) 嵌入水印后的矢量图 ($\text{sim} = 6.3246$)

Fig. 3 (a) Original vector image (b) watermarked vector image (with $\text{sim} = 6.3246$)

对嵌入水印后的矢量图形进行以下四种攻击: 平移, 旋转, 放大(缩小), 加入噪声. 试验表明: 1) 平移只影响矢量图形进行小波分解后的近似分量, 并不改变其细节分量, 因此只要将水印嵌入在其细节分量中, 图形的平移操作对水印没有任何影响. 2) 矢量图形的旋转只会影响小波变换后系数的相位, 而幅值不变, 因此将水印嵌入到幅值中对水印没有任何影响. 3) 按照比例因子 s 对矢量图形进行放大或缩小, 则所有的小波系数会变为 $s \cdot Z_{(1,s)}^f$, 但并不改变对应的特征序列的值, 因此水印仍可完好无损地提取出来. 4) 产生一个长度与矢量图形顶点个数相同的随机噪声序列 rand , 并将此噪声嵌入到矢量图形的顶点中: $x_k^d = x_k + d \cdot \text{rand}_k$, $y_k^d = y_k + d \cdot \text{rand}_k$, d 为噪声的强度. 当图形有明显的视觉失真时, 如图 4(a), 检测出的水印与原水印的相似度仍大于阈值, 即大部分的水印信息仍可以被提取出来, 说明该算法对噪声的攻击有良好的鲁棒性, 可用峰值信噪比 PSNR 表示其性能^[7], 水印相似度与噪声的强度的关系如图 4(b). 本文用相似度表示水印抗各种攻击的性能.

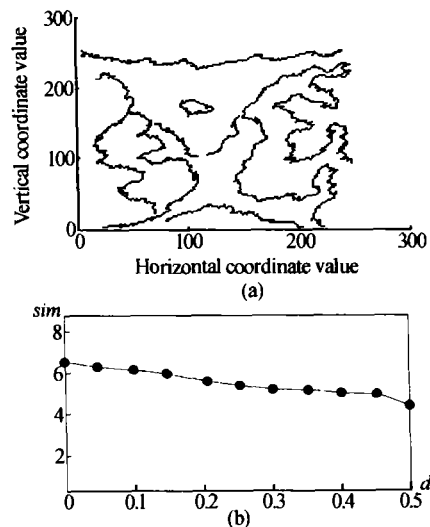


图 4 (a) 在嵌入水印后的矢量图中加入噪声, 当 $d = 0.45$ 时, $\text{sim} = 5.092$, $\text{PSNR} = 68.318$, (b) 水印相似度与噪声强度的关系

Fig. 4 (a) an attacked watermarked vector image by adding noise, when $d = 0.45$, $\text{sim} = 5.092$, $\text{PSNR} = 68.318$. (b) Relationship between intensity of noise and correlation efficient

5 结论

本文将矢量图形的顶点坐标提取出来排序, 并进行小波变换使其转变成为空间和频率上的系数, 根据水印的大小和小波系数的关系, 将水印嵌入到矢量图中. 结果证明: 1) 小波变换具有多分辨分析性, 这与人眼对图形的视觉感知过程相匹配. 2) 在多尺度的小波分量上嵌入水印, 具有更好的抗噪声

能力. 3) 由于水印的嵌入是根据水印的大小和小波系数之间的关系来实现的, 因此在提取水印时不需要原矢量图. 试验证明此算法对图形的攻击具有很好的鲁棒性, 是一种行之有效的办法.

参考文献

- 1 Wolfgang R B, Podilchuk C I, Delp E J. Perceptual watermarks for digital images and video. *Proceeding of the IEEE*, 1999, **87**(7): 1108 ~ 1125
- 2 Ryutarou Ohbuchi, Hiroo Ueda, Shuh Endoh. Robust watermarking of vector digital maps. In: *Proc ICME'2002*, Lausanne, Switzerland, 2002. 26 ~ 29
- 3 Solachidis V, Nikolaidis N, Pitas I. Watermarking polygonal lines using fourier descriptors. *ICASSP 2000*, Instabul Turkey, 2000. 5 ~ 9
- 4 王沛. 基于小波变换的图像自适应盲水印算法. *光学精密工程*, 2002, **3**(10): 248 ~ 250
Wang P. *Optics and Precision Engineering*, 2002, **3**(10): 248 ~ 250
- 5 Kpyo Hong. A blind watermarking technique using wavelet transform. *Industrial Electronics Proceedings ISIE*, 2001. 1946 ~ 1950
- 6 尹康康, 石教英, 潘志庚. 一种鲁棒性好的图像水印算法. *软件学报*, 2001, **12**(5): 668 ~ 677
Yin K K, Shi J Y, Pan Z G. *Journal of Software*, 2001, **12**(5): 668 ~ 677
- 7 Kang K I, Kim K I, Choi J U. A vector watermarking using the generalized square mask. *information technology: Coding and Computing*, 2001. 234 ~ 236

Vector Graphical Objects Watermarking Scheme in Wavelet Domain

Li Yuanyuan, Xu Luping

The Ministry of Education Key Laboratory for Computer Networks and Information Security, School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an, P. R. China, 710071

Received date: 2003-01-16

Abstract A vector graphics authentication technique by embedding digital watermarks is proposed. The vertices coordinate pairs of the vector objects are generated by mapping a 2-D graphics into a sequence. We embed the watermarks into the vector graphics by modifying the DWT magnitude coefficients according to the watermark value, and leaving the angle coefficients unchanged. The experimental results show that the proposed technique successfully survives vector graphical processing operations.

Keywords Vector; Wavelet transform; Geographic Information System; Copyright protection



Li Yuanyuan was born in April, 1979. She received B. S. degree from School of Electronic Engineering, Xidian University in 2001. In the same year and at the same school she continued her education toward Master degree. Now she majors in signal and information processing. Her current research interest is image processing and digital watermark.