

矢量地图高载荷可逆水印算法

邱银国¹, 孙久运¹, 张 伟²

(1 中国矿业大学 环境与测绘学院, 江苏 徐州 221116;

2 安徽科技学院 资源与环境学院, 安徽 滁州 233100)

摘 要: 针对当前的矢量地图水印算法不支持丰富的版权信息嵌入, 稳健性弱等问题, 基于 QR 码和极坐标变换, 提出了一种矢量地图高载荷可逆水印算法. 首先将原始版权信息隐藏在 QR 码中, 然后将该 QR 码作为水印图像嵌入矢量地图数据点中. 为增强算法抵抗几何变换的能力, 将水印嵌入地图数据点的极坐标中. 水印提取后, 可在获得原始 QR 码的同时精确恢复原始地图数据点. 与现有算法相比, 此算法提高了水印的有效载荷, 同时增强了算法在常见攻击下的稳健性.

关键词: 矢量地图; 可逆水印; 高载荷; 版权保护; QR

中图分类号: TP31

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2018)03-0110-06

High-payload Reversible Watermarking Algorithm of Vector Maps

QIU Yin-guo¹, SUN Jiu-yun¹, ZHANG Wei²

(1 School of Environment Science and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116; 2 College of Resource and Environment, Anhui Science and Technology University, Chuzhou 233100, China)

Abstract: Aiming at problems of current watermarking schemes for vector maps, e. g., cannot embed abundant copyright data, low robustness, etc., we propose a novel high-payload and reversible watermarking algorithm for vector maps, based on QR code and polar coordinate transformation. Copyright information is firstly hidden in a QR code, which is then considered as the copyright image and embedded into map vertices. To enhance the robustness of our scheme under geometric transformation, we embed watermarks into polar coordinates of vertices. After watermark extraction, this scheme cannot only obtain the original QR code, but also strictly recover the original vector data. Compared with current schemes, the proposed scheme can effectively increase the size of watermark payload, and it has strong robustness against common geometric and non-geometric attacks.

Key words: vector maps; reversible watermarking; high-payload; copyright protection; QR

1 引言

随着矢量地图侵权行为的日益蔓延, 版权所有

者越来越需要向矢量地图中嵌入大量的版权信息, 以有力地申明版权. 然而, 现有算法的有效载荷无法满足该需求. 受地图数据点数量所限, 当前矢量地图可逆水印算法难以嵌入详尽的版权数据. 丰富的版权信息与有限的地图数据点之间的矛盾已成为矢量

地图水印领域亟需解决的关键问题之一.

当前, 矢量地图水印的研究重点在于算法的稳健性、水印容量等^[1-3], 很少涉及水印载荷的研究. Voigt 等^[4]首先提出了一种矢量地图可逆水印方案, 通过修改矢量地图的整数 DCT 系数嵌入水印. 为提高水印的容量, Voigt 等^[5]利用“移位”及“误差限制”技术, 设计了另一个矢量地图可逆水印方案. 上述两个方案中的水印均属无意义水印, 需要附加的转换机制来识别其含义. 为更有效地申明版权,

Wang 等^[6]和邵承永等^[7]基于“差值扩张”方法提出了两个矢量地图可逆水印算法,通过修改相邻顶点间的距离嵌入有意义水印。这两个算法使用的水印图像为二值图像,仅包含几个简单的字符,难以表达详尽的版权信息。曹刘娟等^[8-9]基于矢量地图空间特征、BP 神经网络和奇异值分解,提出了改进的矢量地图可逆水印算法,增强了水印算法的稳健性,但对于提高水印的有效载荷贡献不大,仍无法完成复杂版权信息的嵌入。杨成松等^[10-11]利用坐标映射和常函数设计了两个适用于矢量地理数据可逆水印方案,可有效抵抗常见的几何与非几何攻击,但在水印载荷方面的表现并不理想。CAO 等^[12]和 Sun 等^[13]分别利用迭代嵌入法、BP 神经网络实现了矢量地图可逆水印算法,具有良好的稳健性和不可见性,但并未显著提高水印的有效载荷。

当前的矢量地图可逆水印算法的研究重点在于水印的容量及算法的稳健性,缺乏针对水印有效载荷的研究。某些特殊的场合,需要在有限的地图数据点中嵌入详尽的版权信息,现有算法的有效载荷大小难以满足需求。为有效提升矢量地图可逆水印算法的有效载荷与稳健性,基于 QR 码和极坐标转换方法,提出了一种能够支持丰富版权信息的矢量地图可逆水印算法。

QR 码具有信息容量大、可靠性高、安全性强等特点^[14],将其应用于矢量地图数字水印,作为版权信息的载体,具有两个优点:(1)信息容量大;(2)容错性强。信息容量大为提升水印的有效载荷提供了思路,容错性强可进一步增强算法的稳健性。

极坐标是一种二维平面坐标,具有对平移与旋转的不变性。对于任一点 v , 假设其直角坐标为 (x_v, y_v) , 其极坐标可表示为 (ρ, θ) 。其中,

$$\begin{cases} \rho = \sqrt{x_v^2 + y_v^2} \\ \theta = \arctan\left(\frac{y_v}{x_v}\right) \end{cases} \quad (1)$$

平面点的极坐标值可在平移和旋转过程中保持不变,这对矢量地图数字水印有着重要意义,可为提高水印算法抵抗几何变换的能力提供方案。

2 高载荷可逆水印算法

2.1 水印生成

2.1.1 特征点提取

考虑到矢量地图中特征点的稳定性,首先提取特征点,然后基于特征点进行水印生成、嵌入与提取。特征点指反映矢量地图基本形状的点^[15],通常

采用“道格拉斯-普克”法进行提取。以一条多段线为例,特征点提取步骤如下:

第 1 步,作一条线段,连接多段线首尾两点;

第 2 步,计算多段线中每一个点到该线段的距离,找出最大距离值 $D_{\max}$;

第 3 步,判断 $D_{\max}$ 与给定的阈值 d 之间的关系:若 $D_{\max} < d$,删除该多段线所有点,无特征点;否则,选择 $D_{\max}$ 对应的点,并将其与多段线首尾两点相连,组成两条线段;

第 4 步,对生成的两条线段,重复步骤 1~3,直至所有点被处理完毕。

2.1.2 数据点映射关系建立

给定一幅矢量地图 G , 对其进行特征点提取,并将特征点和非特征点分别归类形成集合。令 $V_f = \{V_{f_i}, 1 \leq i \leq L\}$ 和 $V_n = \{V_{n_j}, 1 \leq j \leq M\}$ 分别表示特征点和非特征点集合,其中 L 和 M 分别表示特征点和非特征点的数量。然后建立 V_f 和 V_n 间的映射关系。以任意一个非特征点 V_{n_j} ($1 \leq j \leq M$) 为例,其映射步骤如下所示。

第 1 步,计算 V_{n_j} 与每一个特征点 V_{f_i} ($1 \leq i \leq L$) 之间的“精度距离”,计算“精度距离”的方法如式(2)所示,其中 $(x_{n_j}^*, y_{n_j}^*)$ 和 $(x_{f_i}^*, y_{f_i}^*)$ 分别表示 V_{n_j} 和 V_{f_i} 坐标值中精度位之前(含精度位)的部分。

$$Dis(V_{n_j}, V_{f_i}) = \sqrt{(x_{n_j}^* - x_{f_i}^*)^2 + (y_{n_j}^* - y_{f_i}^*)^2} \quad (2)$$

第 2 步,在计算结果中寻找最小值 $Dis_{\min}$;

第 3 步,将 V_{n_j} 与 $Dis_{\min}$ 对应的特征点之间建立映射关系。

然后,根据特征点将所有地图数据点进行分组,每组包含一个特征点及与其存在映射关系的所有非特征点。

2.1.3 水印信息计算

首先将版权信息隐藏在一个 QR 码中,然后对该 QR 码进行 t 次 Arnold 变换以增强版权信息的安全性。将 t 作为密钥存储,以便在水印提取时使用。Arnold 变换的原理如式(3)所示,其中 (x, y) 和 (x', y') 分别表示一个像元的原始坐标及变换后的坐标, D 表示 QR 码的宽度(或高度)。

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \pmod{D} \quad (3)$$

图 1 所示为 Arnold 变换的一个实例。图 1(a)所示为一个 25×25 的 QR 码,图 1(b)~(d)分别为对图 1(a)进行 5 次、20 次和 50 次 Arnold 变换后的结果。由图 1 可知,Arnold 变换是周期性的。因此,



图1 Arnold变换示意图

若 t 已知, 可通过 Arnold 变换周期将置乱后的 QR 码复原。

然后, 定义一个二维数组 $w = \{w[i, j], 0 \leq i \leq D-1, 0 \leq j \leq D-1\}$, 并依据置乱后的 QR 码像元的颜色对其进行赋值。赋值方法是: 若第 i 行、第 j 列的像元的颜色为黑色, $w[i, j] = 1$; 否则, $w[i, j] = 0$ 。将赋值后的 w 作为待嵌入的水印。

2.2 水印嵌入

以一个数据点组为例, 令 V_{fi} 表示其特征点, $\{V_{nj} (1 \leq j \leq k)\}$ 为对应的非特征点集合, k 为非特征点总数, 水印嵌入的步骤如下所示。

第 1 步, 以 V_{fi} 为坐标原点, 任意方向为基准轴, 利用式(1) 对所有非特征点进行极坐标转换。

第 2 步, 对任一个非特征点 V_{nr} , 计算其对应的水印值 w_{nr} , 计算方法如式(4) 所示, 其中 $Hash(\cdot)$ 表示一个将任意长度的输入转换成固定长度的输出的函数, $Dis(V_{nr}, V_{fi})$ 代表 V_{nr} 与 V_{fi} 之间的“精度距离”, d 表示 $Dis(V_{nr}, V_{fi})$ 的数值长度, n_i 表示 $Dis(V_{nr}, V_{fi})$ 中的第 i 位数值。

第 3 步, 对每一个非特征点 $V_{nr} (1 \leq x \leq k)$, 设其极坐标为 (ρ_{nr}, θ_{nr}) , 利用式(5) 完成其对应的水印值 w_{nr} 嵌入, 其中 p 为嵌入强度, $Int(\cdot)$ 和 $Dec(\cdot)$ 分别表示取一个小数的整数部分和小数部分的函数。 (ρ_{nr}, θ_{nr}) 为 V_{nr} 的含水印极坐标。

$$\begin{cases} w_{nr} = w[f(x), g(x)] \\ f(x) = Hash(Dis(V_{nr}, V_{fi})) \bmod D \\ g(x) = (\sum_{i=0}^{d-1} n_i) \bmod D \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \rho_{nr} &= Int(\rho_{nr} \times 10^p) \div 10^p + \\ & (w_{nr} + Dec(\rho_{nr} \times 10^p)) \div 10^{p+1} \end{aligned} \quad (5)$$

第 4 步, 对每个非特征点 $V_{nr} (1 \leq x \leq k)$, 利用式(6) 将其含水印极坐标转换为直角坐标。此处, (x_{fi}, y_{fi}) 代表 V_{fi} 的直角坐标, (x'_{nr}, y'_{nr}) 为 V_{nr} 的含水印直角坐标。

$$\begin{cases} x'_{nr} = x_{fi} + \rho_{nr} \times \cos \theta_{nr} \\ y'_{nr} = y_{fi} + \rho_{nr} \times \sin \theta_{nr} \end{cases} \quad (6)$$

2.3 水印提取

给定一幅含水印矢量地图, 其水印提取步骤可

归纳如下所示。

第 1 步, 利用“道格拉斯-普克”算法及 2.1.1 节中使用的阈值 d , 提取矢量地图的特征点;

第 2 步, 依据 2.1.2 节中描述的方法, 建立特征点与非特征点之间的映射关系, 并对地图数据点进行分组;

第 3 步, 在每个数据点组内, 对非特征点进行极坐标转换, 然后提取水印并恢复原始结点坐标值。

以数据点组 P_i 为例, 令 V_{fi} 和 $\{V_{nj}, 1 \leq j \leq m\}$ 为其特征点及对应的非特征点集合, 定义一个二维数组 $w = \{w[r, l], 0 \leq r \leq D-1, 0 \leq l \leq D-1\}$ 。

首先, 利用 2.2 节中的方法将所有非特征点的直角坐标转换为极坐标。

然后, 对每一个非特征点 $V_{nj}(\rho_{nj}, \theta_{nj})$, 利用式(7) 进行水印提取, w_{nj} 表示提取出的水印值。

$$w_{nj} = Int(Dec(\rho_{nj} \times 10^p) \times 10) \quad (7)$$

最后, 利用式(8), 将提取的水印值赋值给 w 中指定元素, n_i 表示 $Dis(V_{nj}, V_{fi})$ 中的第 i 位数值。

$$\begin{cases} w[f(x), g(x)] = w_{nj} \\ f(x) = Hash(Dis(V_{nj}, V_{fi})) \bmod D \\ g(x) = (\sum_{i=0}^{d-1} n_i) \bmod D \end{cases} \quad (8)$$

此处, 运用统计方法进行最优值选取。即对于 $w[r, l]$, 统计其对应的水印提取结果(0 或 1), 最终采用数量多的结果对其进行赋值。

第 4 步, 将水印值从数据点极坐标值中移除, 获得数据点的原始极坐标值, 并利用式(6) 将所有非特征点的极坐标转换为直角坐标。

第 5 步, 根据 w 生成 QR 码 F , 方法是: 对于每一个 $w[i, j], 0 \leq i \leq D-1, 0 \leq j \leq D-1$, 若其值为 1, 将 F 中第 i 行、第 j 列像元颜色设置为黑色; 否则, 将该像元的颜色设置为白色。

第 6 步, 对 F 进行 $(T-t)$ 次 Arnold 变换, 生成另一 QR 码 F' 。 T 为 F 的 Arnold 变换周期, t 为水印生成阶段对原始 QR 码进行的 Arnold 变换次数。 F' 即为提取出的 QR 码水印图像, 对其解码可获得原始版权信息。

3 实验

采用 10 幅矢量地图进行仿真实验。表 1 中列出了 10 幅实验所用矢量地图的两个基本属性。

实验采用一个语句作为版权信息: “矢量地图的所有者为中国矿业大学, 地址: 徐州市大学路 1 号, 所有未经授权的使用都是不允许的。版权所有, 盗版

必究!”然后,将版权信息进行编码,生成一个纠错等级为 Q、大小为 49×49 的 QR 码,如图 2 所示.将该 QR 码作为水印图像生成水印数据,并令嵌入强度 $q = 1$,对 10 幅矢量地图进行水印嵌入.

表 1 矢量地图的属性

矢量地图	图形数量	结点数量
m_0	151	8 757
m_1	219	9 420
m_2	599	15 936
m_3	221	8 106
m_4	48	7 609
m_5	128	10 236
m_6	117	9 395
m_7	236	12 960
m_8	158	9 032
m_9	323	8 879



图 2 版权 QR 码

3.1 有效载荷实验

将本文算法与当前具有代表性的几个矢量地图可逆水印算法,在水印图像的尺寸和水印的有效载荷两个方面进行比较,结果如表 2 所示.

表 2 水印图像尺寸及水印载荷对比

矢量地图 水印算法	水印图像尺寸/像素	水印有效载荷/bit
本文算法	49×49	107
张驰等,2013	30×82	6
Wang 等,2007	80×120	24
曹刘娟等,2010	80×80	29
Cao 等,2015	128×128	39
Sun 等,2014	44×48	44

从表 2 可见,与现有的矢量地图可逆水印算法相比,本文算法使用的水印图像尺寸小、有效载荷高,很好地验证了算法的高载荷特性.

3.2 可逆性实验

由水印的嵌入及提取过程可知,本文算法在理论上是可逆的.对于 10 幅含水印矢量地图,首先采用 2.3 节中的方法进行水印提取和点坐标恢复,然后针对每个恢复后的点,计算其与对应的原始数据点之间的坐标差.计算方法如式 (9) 所示,

(x_i, y_i) 和 (x'_i, y'_i) 分别表示原始点和恢复点的直角坐标.

$$Er(v_i) = \sqrt{(x_i - x'_i)^2 + (y_i - y'_i)^2} \tag{9}$$

实验结果显示,对每个点 $v_i(x_i, y_i) (1 \leq i \leq n)$, $Er(v_i) = 0 (n \text{ 为数据点总量})$.由此可知,所有的点坐标都可被精确复原,验证了算法的可逆性.

3.3 不可见性实验

图 3 所示为一幅矢量地图及其水印嵌入后的结果,很难从视觉上分辨出两者之间的差别.应用最大误差(Max. Error)和均方根误差(RMSE)两个指标对原始矢量地图及其含水印数据进行误差分析,结果如表 3 所示. Max. Error 和 RMSE 可根据式 (10) 计算,其中 n 为数据点总数量, (x_i, y_i) 和 (x'_i, y'_i) 分别代表第 i 个原始数据点和对应的含水印数据点的直角坐标.从表 3 可以看出, Max. Error 和 RMSE 的计算结果均可以接受,算法的不可见性得到了验证.



(a)原始地图 (b)含水印地图

图 3 水印嵌入实例

表 3 误差分析结果

地图	Max. Error	RMSE
m_0	0.083	0.037
m_1	0.088	0.056
m_2	0.093	0.051
m_3	0.079	0.038
m_4	0.081	0.049
m_5	0.092	0.045
m_6	0.085	0.061
m_7	0.09	0.052
m_8	0.088	0.056
m_9	0.091	0.047

$$\left\{ \begin{aligned} &Max. Error = \\ &Max \{ \sqrt{(x_i - x'_i)^2 + (y_i - y'_i)^2}, 1 \leq i \leq n \} \\ &RMSE = \\ &\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(x_i - x'_i)^2 + (y_i - y'_i)^2]}, 1 \leq i \leq n \end{aligned} \right. \tag{10}$$

3.4 稳健性实验

对 10 幅含水印矢量地图进行常见类型的数据攻击,然后应用本文算法从攻击后的数据中提取水印.使用误码率(BER,错误提取的水印占总水印的百分比)来衡量水印提取的效果,采用“√”和“×”分别表示成功和失败的 QR 码解码结果.

3.4.1 平移/旋转攻击

对含水印矢量地图进行不同程度的平移与旋转,然后进行水印提取实验,结果如表 4 所示,从中可见水印的提取不受地图平移、旋转操作的影响.

表 4 平移/旋转攻击实验结果

地图	平移(72.38246)	旋转(27.86)
m_0	BER=0.00%(√)	BER=0.00%(√)
m_1	BER=0.00%(√)	BER=0.00%(√)
m_2	BER=0.00%(√)	BER=0.00%(√)
10 幅地图均值	BER=0.00%	BER=0.00%

3.4.2 增/删点攻击

本文采用的水印图像尺寸较小(49 像素×49 像素),使得每个水印值被同时嵌入多个地图顶点中,理论上可提高算法抵抗删点攻击的能力;在水印提取时采用统计方法可排除干扰点对水印提取的影响,增强算法对增点攻击的稳健性.

对含水印地图进行不同比例的增、删点,然后进行水印提取实验.结果如表 5 所示,其中 p 表示增/删点数量占原始地图数据点总量的百分比.由表 5 可知,本文算法具备良好的抵抗矢量地图增、删点攻击的能力.

表 5 增/删点攻击实验结果

地图	增点		删点	
	$p=50\%$	$p=60\%$	$p=50\%$	$p=60\%$
m_0	BER=4.54%(√)	BER=10.62%(×)	BER=4.04%(√)	BER=8.45%(×)
m_1	BER=4.21%(√)	BER=10.16%(×)	BER=3.71%(√)	BER=8.00%(×)
m_2	BER=3.83%(√)	BER=9.79%(×)	BER=3.37%(√)	BER=7.46%(×)
10 幅地图均值	BER=4.00%	BER=9.91%	BER=3.54%	BER=7.12%

3.4.3 简化攻击

选择两个具有代表性的矢量地图可逆水印算法(邵承永等^[7],Cao 等^[12])与本文算法在抵抗简化攻击方面的表现进行比较.分别采用三种算法进行水印嵌入,然后对含水印地图进行不同强度的简化操作,最后分别利用这三种算法进行水印提取.结果如表 6 所示,可以看出本文算法具有更强的抵抗简化

攻击能力.

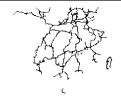
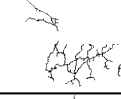
表 6 简化攻击实验结果

地图	水印算法	38.8%	50.3%	59.2%
m_0	本文算法	BER=2.50%(√)	BER=4.00%(√)	BER=8.29%(×)
	文献[7]	BER=3.04%(√)	BER=6.37%(×)	BER=14.91%(×)
	文献[12]	BER=2.79%(√)	BER=5.91%(×)	BER=13.79%(×)
	本文算法	BER=2.29%	BER=3.62%	BER=7.62%
10 幅地图均值	文献[7]	BER=2.83%	BER=5.66%	BER=13.20%
	文献[12]	BER=2.37%	BER=5.29%	BER=12.66%

3.4.4 裁剪攻击

为衡量算法在抵抗裁剪攻击方面的性能,将其与两个代表性算法^[7,12]进行比较.分别使用三种算法进行水印嵌入,然后对含水印地图进行不同位置、不同比例的裁剪操作,最后分别用三种算法对进行相应裁剪后的地图提取水印.实验证明本文算法具有更强的抵抗地图裁剪攻击的能力.以某一幅矢量地图为例,实验结果如表 7 所示.

表 7 算法抵抗裁剪攻击比较结果

裁剪比例/%	裁剪位置	本文算法	文献[7]	文献[12]
40		BER=2.62%(√)	BER=3.29%(√)	BER=2.96%(√)
50		BER=3.79%(√)	BER=5.87%(×)	BER=4.62%(×)
60		BER=7.79%(×)	BER=13.04%(×)	BER=11.87%(×)

4 结束语

针对当前矢量地图可逆水印算法的有效载荷低、稳健性不强等问题,基于 QR 码和极坐标变换技术,提出了一种高载荷的矢量地图水印算法.利用 QR 码信息容量大的优点,将 QR 码作为水印信息的容器,该算法支持丰富的版权信息嵌入.同时,利用极坐标的稳定性,将水印嵌入数据点的极坐标中,可提高水印算法的稳健性.实验结果证明:本文的算法在有限的地图数据点中,可以大幅提高水印的有效载荷;相比现有的算法,本文算法的稳健性得到了

有效提升. 因此,本文算法适用于对水印载荷需求高的矢量地图版权保护场合.

参考文献:

[1] 杨辉, 闵连权, 侯翔. 矢量地图数据数字水印抗拼接算法[J]. 测绘科学技术学报, 2015, 32(1): 91-95.

[2] 曹阳, 肖菁, 张文才. 基于零水印和可逆水印的矢量地图多重水印算法[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2016, 48(3): 69-74.

[3] 张弛, 李安波, 闫国年, 等. 以夹角调制的矢量地图可逆水印算法[J]. 地球信息科学学报, 2013, 15(2): 180-186.

[4] Voigt M, Yang B, Brush C. Reversible watermarking of 2d-vector data [C]// Proceedings of the 2004 Multimedia and Security Workshop on Multimedia and Security. IEEE, 2004: 160-165.

[5] Voigt M, Yang B, Brush C. High-capacity reversible watermarking for 2D vector data [C]// Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. SPIE, 2005, 5681: 409-417.

[6] Wang X T, Shao C Y, Xu X G, et al. Reversible data-hiding scheme for 2-D vector maps based on difference expansion [J]. IEEE Transactions on Information Forensics & Security, 2007, 2(3): 311-320.

[7] 邵承永, 王孝通, 徐晓刚, 等. 矢量地图的无损数据隐藏算法研究[J]. 中国图象图形学报, 2007, 12(2): 206-211.

[8] 曹刘娟, 门朝光, 孙建国. 基于空间特征的二维矢量地图可逆水印算法原理[J]. 测绘学报, 2010, 39(4):

422-427.

[9] 曹刘娟, 门朝光, 孙建国. 二维矢量地图双重零水印算法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2011, 32(3): 340-344.

[10] 杨成松, 朱长青, 陶大新. 基于坐标映射的矢量地理数据全盲水印算法[J]. 中国图象图形学报, 2010, 15(4): 684-688.

[11] 杨成松, 朱长青. 基于常函数的抗几何变换的矢量地理数据水印算法[J]. 测绘学报, 2011, 40(2): 256-261.

[12] Cao L J, Men C G, Ji R R. High-capacity reversible watermarking scheme of 2D-vector data [J]. Signal, Image and Video Processing, 2015, 9(6): 1387-1394.

[13] Sun J G, Zhang G Y, Yao A H, et al. A reversible digital watermarking algorithm for vector maps [J]. International Journal of Network Security, 2014, 16(1): 40-45.

[14] 林威, 翟信德, 朱长青, 等. 基于 QR 码的遥感影像数字水印算法[J]. 北京邮电大学学报, 2015, 38(1): 26-30.

[15] Douglas D H, Peucker T K. Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature [J]. Can Cartogr, 1973, 10(2): 112-122.

作者简介:

邱银国 男, (1987-), 博士研究生. 研究方向为地理信息安全. E-mail: qiuyinguo@foxmail. com.

孙久运 男, (1974-), 博士, 副教授. 研究方向为信息隐藏.

张伟 男, (1988-), 博士, 讲师. 研究方向为数字水印.

(上接第 109 页)

[7] 刘雪艳, 李战明. 无线传感器网中基于隐私同态的数据聚合方案[J]. 计算机工程, 2014, 40(8): 102-103.

[8] 岳海兵, 葛洪伟. 基于能量分布的异构传感器网络分簇算法[J]. 计算机工程, 2010, 36(1): 118-119.

[9] 罗俊. 无线传感器网络性能建模与优化设计[D]. 上海: 上海交通大学, 2010.

[10] Kuo T W, Lin K C J, Tsai M J. On the construction of data aggregation tree with minimum energy cost in wireless sensor networks: NP-completeness and approximation algorithms [J]. IEEE Transactions on Computers, 2016, 65(10): 3109-3121.

[11] 付帅, 马建峰, 李洪涛, 等. 改进的基于分簇无线传感器网络的数据聚合算法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2014, 44(4): 1118-1125.

[12] 付菁波. 无线传感器网络分簇路由算法的研究[D]. 西

安: 西安电子科技大学, 2013.

[13] 高峰. 基于自然计算的 WSN 路由技术研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2011.

[14] 梁俊斌, 李陶深. 无线传感网中基于自适应概率广播的数据保存[J]. 计算机研究与发展, 2012, 49(10): 2229-2240.

作者简介:

武婧婧 女, (1983-), 硕士研究生, 工程师. 研究方向为模式识别和软件工程. E-mail: 13915292@qq. com.

韦素媛 女, (1971-), 博士, 副教授. 研究方向为计算机网络通信.

齐小刚 男, (1973-), 博士, 教授, 博士生导师. 研究方向为网络优化与复杂系统建模.