

矢量地图的无损数据隐藏算法研究

邵承永¹⁾ 王孝通¹⁾ 徐晓刚¹⁾ 牛夏牧²⁾

¹⁾(海军大连舰艇学院光电技术研究所, 大连 116018) ²⁾(哈尔滨工业大学信息对抗技术研究所, 哈尔滨 150001)

摘 要 在矢量地图中隐含水印信息, 地图数据的质量往往由于水印的嵌入而受到影响。可逆水印技术(又称无损数据隐藏)具有完整恢复载体数据的能力, 因而更加适用于矢量地图。基于差值扩大的思想, 提出了一种应用于矢量地图的无损数据隐藏算法。算法根据矢量地图对数据精度的特殊要求提出了相应的水印嵌入条件, 并通过修改地图中相邻顶点坐标间的差值来嵌入水印信息。水印的提取过程不仅能够得到隐藏信息, 而且能够准确无误地恢复原始地图数据。采用两类地图进行实验, 实验结果表明, 算法在具有较强坐标相关性的地图中具有较高的嵌入容量, 并且引入较低的扰动。算法的应用前景包括矢量地图数据的篡改鉴别、元数据格式兼容以及基于矢量地图的隐藏通信。

关键词 矢量地图 无损数据隐藏 差值扩大 信息载荷

中图分类号: TP309 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2007)02-0206-06

Study on Lossless Data Hiding Algorithm for Digital Vector Maps

SHAO Cheng-yong¹⁾, WANG Xiao-tong¹⁾, XU Xiao-gang¹⁾, NIU Xia-mu²⁾

¹⁾(Institute of Photoelectric Technology, Dalian Naval Academy, Dalian 116018)

²⁾(Institute of Information Countermeasure Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

Abstract Embedding watermark in a digital vector map could generally degrade the quality of the map data. However, invertible watermarking(or lossless data hiding) is more appropriate to vector maps for its ability to recover the original cover data. A lossless data hiding algorithm for digital vector maps based on difference expansion is proposed in this paper.

According to the vector map's special requirement to data precision, an embedding condition is firstly presented. The watermark can be embedded by modifying the coordinate differences between the adjacent vertices and the original map can be recovered bit-by-bit after the watermark has been extracted. Two kinds of original maps are used in the experiments and the results indicate that higher payload and lower distortions could be achieved in the maps with higher correlated coordinates. The potential usages of the proposed scheme would include the map data authentication, meta data format compatibility, and secret communication based on vector maps.

Keywords vector map, lossless data hiding, difference expansion, payload

1 引言

随着地理信息系统的广泛应用, 数字矢量地图在分发和使用过程中存在的诸如版权保护、篡改鉴别等数据安全问题日益凸显出来。数字水印技术被引入到矢量地图数据中, 成为解决此类问题的重要

辅助手段^[1~4]。但是, 水印数据的嵌入不可避免地会给原始地图数据带来扰动, 在一定程度上降低了地图数据的质量。可逆水印技术又称为无损数据隐藏, 是指能够完整恢复原始载体数据的水印算法。该技术主要应用于原始载体数据不容篡改的场合, 如医学影像和用于法庭证据的数据。由于矢量地图的应用环境比较严格, 通常希望避免对原始地图数

基金项目: 国家自然科学基金项目(60473141)

收稿日期: 2006-10-13; **改回日期**: 2006-11-08

第一作者简介: 邵承永(1974 ~), 男。现为海军大连舰艇学院交通信息工程及控制专业博士研究生。主要研究方向为数字水印和信息安全。E-mail: shaochengyong@126.com

据的任何改动,因此可逆水印技术对于矢量地图数据具有很强的适用性。目前可逆水印技术的研究主要集中在栅格图像领域,主要的方法包括利用可逆模加^[5]、无损压缩^[6]、改变直方图^[7,8]和差值扩大^[9]来实现算法的可逆性,针对2维矢量数据的可逆算法研究则较少受到关注。Voigt等人通过改变原始矢量地图数据的整数DCT系数来隐含水印信息^[10],这也是目前公开发表的关于2维矢量图形可逆水印算法的仅有的一篇文章。该算法存在的主要缺陷是水印嵌入对含水印地图数据造成的扰动过大。国内也有人进行矢量地图水印算法的研究工作^[11-15],但尚未见到有关可逆算法的讨论。

差值扩大法^[9]是由Tian提出的一种用于栅格图像的可逆水印算法。本文借鉴该算法的实现思想,提出了一种矢量地图空间域无损数据隐藏算法。矢量地图数据与栅格图像数据在应用环境上的区别决定了在这两类数据之中嵌入水印信息必须遵循不同的嵌入原则。栅格图像水印需要保证图像的视觉质量,而矢量地图水印则关注数据精度。本文根据矢量地图对数据精度的严格要求提出了采用差值扩大法嵌入水印的条件,通过对地图中满足嵌入精度条件的相邻顶点的坐标差值进行移位操作,在不损失原始信息的情况下为水印数据提供额外的存储空间。算法的实质是利用了地图邻近顶点坐标数据具有较强相关性的特点。当隐藏的水印信息被提取出来之后,原始地图数据能够得到无损的恢复。

2 差值扩大技术

差值扩大技术用于在数字图像中实现无损数据隐藏,其基本思想可以归结为:针对具有较强相关性的原始载体数据中的相邻数据点 x_1 和 x_2 (原始数据均为整数),首先用一组可逆变换来分别计算二者的差值 d 和整数均值 m ,即

$$\begin{cases} d = x_1 - x_2 \\ m = \left\lfloor \frac{x_1 + x_2}{2} \right\rfloor \end{cases} \quad (1)$$

这组变换是可逆的,其逆变换为

$$\begin{cases} x_1 = m + \left\lfloor \frac{d+1}{2} \right\rfloor \\ x_2 = m - \left\lfloor \frac{d}{2} \right\rfloor \end{cases} \quad (2)$$

其中, $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示向下取整。载体数据的相关性意味

着大多数情况下 x_1 和 x_2 的取值比较接近,因此其差值 d 通常比较小。在一定的误差范围内,通过将 d 值扩大为原来的 2^i 倍(即左移 i 位),即可为待隐藏的数据提供 i 比特的冗余空间。将带有隐藏数据的差值记为 d' ,结合原先的整数均值 m ,含水印数据可以通过逆变换(式(2))得到。差值扩大算法用于无损数据隐藏具有两个主要的优点:首先,由于 d 值本身较小,因此水印嵌入引入的误差较小;另外,由逆变换可知,每个差值上引入的误差($d' - d$)将由两个数据点 x_1 和 x_2 共同承担,因此每个数据点所承受的误差比较均匀。

3 矢量地图的无损数据隐藏方案

由前文分析可见,差值扩大技术在本质上是利用了原始数据的相关性来为隐藏数据提供存储空间。大多数自然图像数据具有强相关性的特点,即邻近像素通常具有相近的灰度值。而矢量地图元素(多边曲线和多边形)是由大量密集的顶点按照特定的顺序排列而成的,地图数据就是这些顶点的2维坐标序列。在同一地图元素中,顶点的密集性使得大多数相邻顶点的位置十分接近,坐标数据间的差值也很小。地图坐标数据体现出的这种强相关性使得差值扩大技术能够应用于2维矢量地图的无损数据隐藏。

3.1 顶点分组变换与嵌入精度条件判断

(1) 顶点分组变换

一幅原始地图必然由点、线段、多边曲线和多边形4种类型的元素构成。点元素只包含一个顶点,因此不能用作数据隐藏。对于其他类型的每一个元素,首先进行顶点分组。以一个元素为例,假设该元素所包含的顶点表示为 $\{v_1, v_2, v_3, v_4, \dots\}$,将所有顶点按照先后顺序,每相邻两点作为一组,则该元素的顶点被划分为 $\{(v_1, v_2), (v_3, v_4), \dots\}$ 。对原始地图中除点元素以外的所有元素都采用上述方法进行分组,则原始地图中绝大多数相邻顶点都两两组合为“顶点对”。假设其总数为 N ,则其中任意一组可以表示为

$$(v_1^i, v_2^i) = \{(x_1^i, y_1^i), (x_2^i, y_2^i)\} \quad i \in [1, N]$$

其中, v_1^i 和 v_2^i 为构成该组的两个顶点,而 (x_1^i, y_1^i) 和 (x_2^i, y_2^i) 分别是这两点的2维坐标。接下来对每组中的两个顶点,分别计算其横、纵坐标的差值和整数均值,即

$$\begin{cases} d_x^i = x_1^i - x_2^i \\ m_x^i = \left\lfloor \frac{x_1^i + x_2^i}{2} \right\rfloor \\ d_y^i = y_1^i - y_2^i \\ m_y^i = \left\lfloor \frac{y_1^i + y_2^i}{2} \right\rfloor \end{cases}$$

$$i \in \{1, 2, \dots, N\}$$

于是得到分属横、纵坐标的长度为 N 的差值序列和整数均值序列:

$$\begin{cases} D_x = \{d_x^1, d_x^2, \dots, d_x^N\} \\ M_x = \{m_x^1, m_x^2, \dots, m_x^N\} \\ D_y = \{d_y^1, d_y^2, \dots, d_y^N\} \\ M_y = \{m_y^1, m_y^2, \dots, m_y^N\} \end{cases}$$

要在原始地图的横坐标(纵坐标)中隐藏信息,只需要将差值扩大技术应用到差值序列 $D_x(D_y)$ 中。即对 $D_x(D_y)$ 中符合条件的数据向左移位,并将空出来的数据位用于存放待隐藏的信息。

(2) 嵌入精度条件

通常矢量地图数据都有各自的精度误差容限(记为 τ),当地图坐标数据受到的扰动低于 τ 时,不会影响地图的可用性。因此,水印嵌入所引入的坐标误差通常也应该小于 τ 。在这个限制下,并不是所有的坐标差值 D_x 和 D_y 都适合进行移位操作,而是必须满足一定的嵌入精度条件。本文仅考虑差值扩大2倍(即左移一位)的情况,假设当前需要将水印数据位 $w_i \in \{0, 1\}$ 嵌入到“顶点对” (v_1^i, v_2^i) 的横坐标中,则数据嵌入后对应的差值 d_x^i 变为

$$d_x^{i'} = 2 \times d_x^i + w_i \quad (3)$$

通过式(2)将 $d_x^{i'}$ 和 m_x^i 进行逆变换可以得到含水印的横坐标数据:

$$\begin{cases} x_1^{i'} = m_x^i + \left\lfloor \frac{d_x^{i'} + 1}{2} \right\rfloor \\ x_2^{i'} = m_x^i - \left\lfloor \frac{d_x^{i'}}{2} \right\rfloor \end{cases} \quad (4)$$

显然,为保证含水印地图的可用性,必须同时满足 $|x_1^{i'} - x_1^i| \leq \tau$ 和 $|x_2^{i'} - x_2^i| \leq \tau$,将式(3)、(4)代入该条件并整理得到等价条件为

$$\begin{cases} \left| \left\lfloor \frac{2 \times d_x^i + w_i + 1}{2} \right\rfloor - \left\lfloor \frac{d_x^i + 1}{2} \right\rfloor \right| \leq \tau \\ \left| \left\lfloor \frac{2 \times d_x^i + w_i}{2} \right\rfloor - \left\lfloor \frac{d_x^i}{2} \right\rfloor \right| \leq \tau \end{cases} \quad (5)$$

依据 d_x^i 的奇偶性和 w_i 的取值 $w_i \in \{0, 1\}$, 式

(5)中所包含的两个子条件经化简并取交集,最终得到水印嵌入的精度限制条件为

$$-2\tau + 1 \leq d_x^i \leq 2\tau - 2 \quad (6)$$

依据式(6)所述条件,可以依次检验全部 N 个“顶点对” $\{(v_1^i, v_2^i) | i = 1, \dots, N\}$ 是否适合用差值扩大的方法来嵌入水印数据,并且生成一个长度为 N 的二值标志序列 $\mathbf{flag} = \{f_i \in \{0, 1\} | i = 1, \dots, N\}$ 。其中 f_i 为 0 的位置代表不适合移位嵌入的“顶点对”,而 f_i 为 1 的位置则对应适合进行差值扩大的“顶点对”。

3.2 水印数据组成

为确保算法的可逆性并尽可能提高有效信息载荷,水印数据(记为 W)的组成可以由下式表示:

$$W = \text{comp}(\mathbf{flag}) + \text{comp}(\mathbf{lsb}) + \text{payload} + \text{control}$$

式中各项的意义如下:

$\text{comp}(\mathbf{flag})$ 为经过无损压缩后的 $\mathbf{flag}$ 数据。在水印提取阶段,当隐含的水印信息被提取出来之后,为进一步恢复原始地图数据,必须知道哪些“顶点对”在水印嵌入时采用了差值扩大法,因此标志数据 $\mathbf{flag}$ 需要成为隐含水印信息的一部分,以供数据恢复阶段使用。

$\text{comp}(\mathbf{lsb})$ 为水印嵌入时,差值序列 $D_x(D_y)$ 中对应 $\mathbf{flag}$ 为 1 的元素将用差值扩大的方式来隐含水印数据,而对应 $\mathbf{flag}$ 为 0 的元素将采用直接替换最不显著位(LSB)的方式来存储水印信息。因此,为保证算法的可逆性,这些原始的 LSB 数据必须保存下来以供数据恢复时使用。 $\mathbf{lsb}$ 就是差值序列中所有对应 $\mathbf{flag}$ 为 0 的元素的 LSB 组成的数据。和 $\mathbf{flag}$ 一样,它经过无损压缩后,也作为水印数据的一部分。

payload 为有效信息载荷。根据水印系统所需完成的功能,可以是原始地图数据的数字摘要(用于篡改鉴别),或者是地图元数据(用于地图格式兼容),也可以是用户需要传输的信息(作为一种隐藏通信方式)。

control 为一些额外的控制数据,用于将前述3类数据合理地组织起来以构成完整的水印数据。

如果原始地图划分的“顶点对”的总数为 N ,则最终生成的水印数据 W 的长度也为 N ,记为 $W = \{w_1, \dots, w_N\}$ 。算法的实际有效信息载荷为

$$N - \text{length}(\text{comp}(\mathbf{flag}) + \text{comp}(\mathbf{lsb}) + \text{control})$$

其中, $\text{length}(\cdot)$ 表示二进制长度。

3.3 水印嵌入和提取

(1) 水印嵌入

以在原始地图横坐标中隐藏数据为例。前文得到的差值序列 D_x 、标志序列 $flag$ 和水印数据 W 均包含 N 个元素, 水印嵌入的任务就是通过修改 D_x 来隐藏水印数据 W 。修改方法如下:

$$d_x^i = \begin{cases} 2 \times d_x^i + w_i & f_i = 1 \\ 2 \times \lfloor d_x^i / 2 \rfloor + w_i & f_i = 0 \end{cases} \quad (7)$$

$i = 1, 2, \dots, N$

其中, d_x^i 、 f_i 和 w_i 分别是 D_x 、 $flag$ 和 W 的元素, 计算得到的含水印差值序列为 $D_x' = \{d_x^1, \dots, d_x^N\}$ 。将 D_x' 和 M_x 通过式(2)进行逆变换, 即可得到含水印的横坐标数据。在纵坐标中嵌入水印的方法完全相同。

(2) 水印提取和原始数据恢复

对于横坐标中含有隐藏信息的地图, 首先用同样的方法对顶点进行分组并计算相应的差值序列 D_x' 和整数均值序列 M_x , 然后提取差值序列 D_x' 的最低比特位即得到隐藏的水印序列 W 。 W 可以进一步划分为有效信息载荷(payload)以及两个压缩序列。其中有效信息载荷(payload)可以用来完成水印系统的预定功能, 而两个压缩序列解压后得到的标志序列(flag)和原 LSB 序列(lsb)将用于恢复原始地图数据。

为恢复原始地图, 首先要得到原始差值序列 D_x 。对于 $i = 1, \dots, N$, D_x 中的每个元素 d_x^i 通过下式来计算:

$$d_x^i = \begin{cases} \lfloor d_x^i / 2 \rfloor & f_i = 1 \\ 2 \times \lfloor d_x^i / 2 \rfloor + lsb(j) & f_i = 0 \end{cases} \quad (8)$$

其中, d_x^i 和 f_i 分别是 D_x' 和 $flag$ 中的元素。上式表明, 对应 $f_i = 1$ 的 d_x^i 是由 d_x^i 经差值扩大并加入水印数据后得到的, 因此将 d_x^i 舍弃最低位后右移一位即得到原始差值 d_x^i 。而对应 $f_i = 0$ 的 d_x^i 则是由水印数据直接替换 d_x^i 的最低位得到的, 因此为得到 d_x^i , 需要将 d_x^i 的最低位还原成相应的原始值 $lsb(j)$, 式中 j 为 lsb 中的索引。得到原始差值序列 D_x 后, 结合整数均值序列 M_x , 即可通过式(2)完全恢复原始地图数据。因此, 本算法为无损的数据隐藏算法。

4 实验结果

如图1和图2所示, 实验分别以两类矢量地图

作为水印嵌入的载体数据。其中, 图1为我国河流分布图, 比例尺为 1:400 万, 总共包含顶点数目为 252 000 个, 地图的精度误差容限为 $\tau = 0.5 \text{ km}$ 。图2为 1:10 000 的等高线图, 该图包含顶点数为 42 964 个, 其误差容限为 $\tau = 1.5 \text{ m}$ 。两种地图的坐标数据分别为精确到小数点后 6 位和 7 位的小数。由于本算法适用于整数, 因此实验前需先将所有数据乘以 $10^6 (10^7)$ 转换成整数坐标。为增加有效信息载荷, 本文在地图横、纵坐标中均隐藏数据, 尽管含水印地图中部分顶点的误差超过了误差容限 τ , 但由于算法能够完全恢复原始地图数据, 因此并不影响地图的使用价值。实验中的有效隐藏信息包含 3 个部分, 分别是原始地图的 MD5 哈希值、地图元数据、和一幅水印图像。

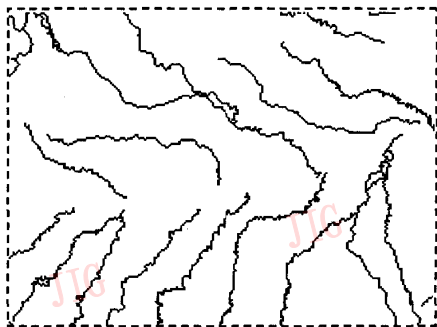


图1 河流分布图

Fig. 1 River map

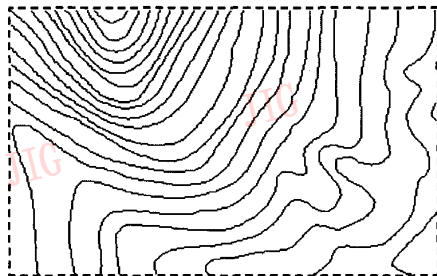


图2 等高线图

Fig. 2 Contour map

图3和图4分别是嵌入到两类地图中的水印图像。其中图3为 92×184 的灰度图, 该图被嵌入到河流分布图中, 而图4为 80×120 的二值图, 该图被嵌入到等高线图中。上述 3 部分数据分别用于原始地图的篡改检测、元数据格式兼容和隐藏通信。

图5和图6为包含隐藏信息的地图, 可以看到算法没有对地图引入过大的扰动。这里采用均方根



图 3 92 × 184 的灰度图
Fig. 3 Grayscale image(92 × 184)



图 4 80 × 120 的二值图
Fig. 4 Binary image(80 × 120)

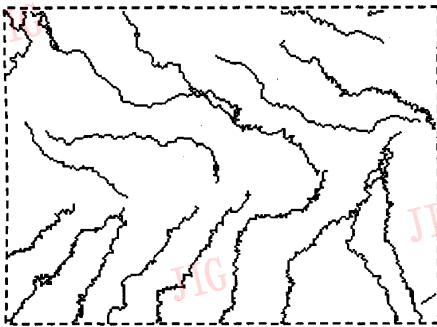


图 5 含水印河流分布图
Fig. 5 Watermarked river map

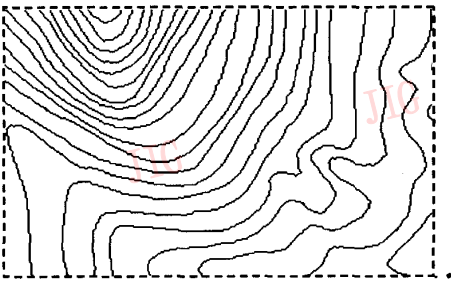


图 6 含水印等高线图
Fig. 6 Watermarked contour map

误差(RMSE)来度量水印嵌入带来的地图坐标扰动。两幅含水印地图的 RMSE 分别为 0.002 13 和 0.009 91。图 7 和图 8 为提取的水印图像。算法具



图 7 提取的水印图像(河流分布图)
Fig. 7 Extracted watermark(river map)



图 8 提取的水印图像(等高线图)
Fig. 8 Extracted watermark(contour map)

有完全恢复原始地图的能力。以河流分布图为例,图 9 为恢复后的地图,通过 MD5 哈希值的比较可以证明该图与原始河流分布图完全相同。算法在不同的载体地图中具有不同的信息载荷。在河流分布图中,算法的实际信息载荷为 146 550bits,平均 0.58 bit/vertex,而在等高线图的实际信息载荷为 14 754bits,平均 0.34bit/vertex。由上述实验结果可见,算法的性能与原始地图的特征有关,并且主要取决于地图坐标数据的相关性强弱。河流分布图具有复杂的外形特征,其相邻顶点的间距相对较小,坐标数据具有较强的相关性,因此算法能够在引入较小误差的同时获得较高的嵌入容量。而等高线图的外形比较平滑,通常地图顶点的间距较大,坐标的相关

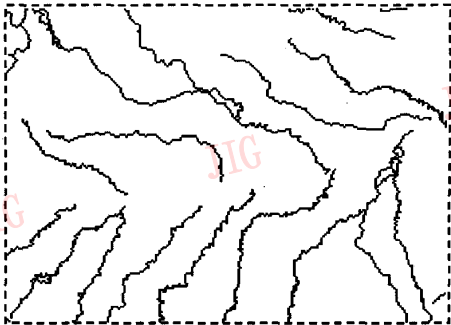


图 9 恢复后的河流分布图
Fig. 9 Recovered river map

性较弱,因此导致较大的嵌入误差和较低的嵌入容量。

5 结 论

提出了一种应用于矢量地图数据的无损数据隐藏算法。由于矢量地图的应用环境比较严格,不允许随意改动数据,因此数据隐藏的可逆性对于矢量地图水印具有十分重要的意义。基于差值扩大的思想,本算法利用地图相邻顶点坐标的相关性,将隐藏信息嵌入到地图数据的横、纵坐标中。算法引入的扰动比较小,而且能够完全恢复原始地图数据。算法的有效信息载荷主要取决于原始地图数据的相关程度。坐标数据的相关性越强,算法的嵌入容量越高,同时引入的误差越小。将原始地图的数字摘要、元数据,以及一定长度的秘密信息构成水印数据,算法能够实现原始地图数据的篡改鉴别、元数据格式兼容以及基于矢量地图的隐藏通信。算法的缺陷是地图顶点的扰动方向没有考虑原始地图的形状特征,因此在充分放大的地图中,这些扰动使地图具有不自然的外形特征。进一步的工作是使算法具有更好的形状保持特性和更高的有效信息载荷。

参考文献 (References)

- Ohbuchi R, Ueda H, Endoh S. Robust watermarking of vector digital maps [A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME '02) [C], Lausanne, Switzerland, 2002: 577 ~ 580.
- Voigt M, Busch C. Feature-based watermarking of 2d-vector data [A]. In: Proceedings of SPIE, Security and watermarking of Multimedia Content [C], Santa Clara, USA, 2003: 359 ~ 366.
- Nikolaidis N, Pitas I, Solachidis V. Fourier descriptors watermarking of vector graphics images [A]. In: Proceedings of International Conference on Image Processing [C], Vancouver, BC, Canada, 2000: 9 ~ 12.
- LI Yuan-yuan, XU Lu-ping. A blind watermarking of vector graphics images [A]. In: Proceedings of Fifth International Conference on Computational Intelligence and Multimedia Applications (ICCIMA2003) [C], Xi'an, P. R. China, 2003: 424 ~ 429.
- Honsinger C W, Jones P, Rabbani M, et al. Lossless Recovery of an Original Image Containing Embedded Data [P]. US Patent: 77 102/E-D, 1999.
- Fridrich J, Goljan J, Du R. Invertible authentication [A]. In: Proceedings of SPIE, Security and Watermarking of Multimedia Content [C], San Jose, California, 2001: 197 ~ 208.
- Ni Z, Shi Y Q, Ansari N, et al. Reversible data hiding [A]. In: Proceedings of International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS2003) [C], Bangkok, Thailand, 2003: 912 ~ 915.
- Leest A, Veen M, Bruekers F. Reversible image watermarking [A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing (ICIP03) [C], Barcelona, Spain, 2003: 731 ~ 734.
- Tian J. Reversible watermarking by difference expansion [A]. In: Proceedings of Workshop on Multimedia and Security: Authentication, Secrecy, and Steganalysis [C], Juan-les-pins, France, 2002: 19 ~ 22.
- Voigt M, Yang B, Busch C. Reversible watermarking of 2d-vector data [A]. In: Proceedings of the 2004 multimedia and security workshop on Multimedia and security [C], Magdeburg, Germany, 2004: 160 ~ 165.
- ZHOU Xu, BI Du-yan. Use digital watermarking to protect GIS data by Chinese remaindering [J]. Journal of Image and Graphics, 2004, 9(5): 611 ~ 615. [周旭, 毕彦彦. 基于中国剩余定理的GIS数字水印算法[J]. 中国图象图形学报, 2004, 9(5): 611 ~ 615.]
- WANG Xun, LIN Hai, BAO Hu-jun. A robust watermarking algorithm for vector digital mapping [J]. Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics, 2004, 16(10): 1377 ~ 1381. [王勋, 林海, 鲍虎军. 一种鲁棒的矢量地图数字水印算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2004, 16(10): 1377 ~ 1381.]
- LI Yuan-yuan, XU Lu-ping. Copyright protection of the vector map using the digital watermark [J]. Journal of Xidian University (Natural Science), 2004, 31(5): 719 ~ 723. [李媛媛, 许录平. 用于矢量地图版权保护的数字水印[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2004, 31(5): 719 ~ 723.]
- HU Yun, WU Hong-tao, ZHANG Han-yu, et al. A digital watermark scheme in vector data [J]. Computer Engineering and Applications, 2004, 40(21): 28 ~ 30. [胡云, 伍宏涛, 张涵钰等. 矢量数据中水印系统的设计与实现[J]. 计算机工程与应用, 2004, 40(21): 28 ~ 30.]
- ZHANG Hai-tao, LI Zhao-ping, SUN Le-bing. Development of geo-information watermark system [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2004, (5): 42 ~ 44. [张海涛, 李兆平, 孙乐兵. 地理信息水印系统的开发[J]. 测绘通报, 2004, (5): 42 ~ 44.]