

中图法分类号: P208 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2024)07-2075-12

论文引用格式: Xi X, Qu C Y, Hou X and Du J L. 2024. Vector map watermarking utilizing the ratio invariance of hybrid domain. *Journal of Image and Graphics*, 29(07):2075-2086(奚旭, 瞿成意, 侯渲, 杜景龙. 2024. 运用混合域比值不变性的矢量地图水印算法. *中国图象图形学报*, 29(07):2075-2086)[DOI:10.11834/jig.230305]

运用混合域比值不变性的矢量地图水印算法

奚旭¹, 瞿成意¹, 侯渲^{2,3}, 杜景龙^{1*}

1. 苏州科技大学地理科学与测绘工程学院, 苏州 215009; 2. 中国科学院流域地理学重点实验室
中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008; 3. 国家地球系统科学数据中心湖泊一流域分中心, 南京 210008

摘要: 目的 传统基于频率域的矢量地图水印算法往往通过直接修改变换系数实现水印嵌入, 嵌入位置随机, 且嵌入强度难以控制, 实用能力受限。为此, 本文挖掘了离散小波变换(discrete wavelet transform, DWT)和复数奇异值分解(complex singular value decomposition, CSVD)系数比值作为新的水印嵌入域, 融合系数放大法和量化索引调制(quantization index modulation, QIM)提出了一种嵌入强度可控的鲁棒性矢量地图水印算法。方法 利用道格拉斯-普克算法提取矢量地图特征点, 并基于特征点构建复数序列, 对复数序列进行二层DWT, 得到二层低频系数和二层高频系数。在此基础上, 利用CSVD分别计算二层低频和高频系数的奇异值, 并以奇异值比值作为水印嵌入域。在水印嵌入阶段, 对系数比值放大合适倍数, 通过调制放大后的奇异值比值来控制水印嵌入误差, 并实现水印信息的盲提取。结果 与最新的3种方法进行比较, 本文算法从平移、旋转和缩放的组合攻击中提取的水印图像的归一化相关性系数(normalized correlation, NC)值从低于0.6提升至1。此外, 在裁剪、简化和几何攻击的任意组合攻击中, 本文算法均能够提取出NC值为1的水印图像, 相较于对比方法, 鲁棒性更加全面。在不可见性方面, 本文算法表现优势, 水印嵌入造成的误差被控制在毫米级。结论 本文所提的矢量地图水印算法挖掘了多重频率域变换的比值作为水印嵌入域, 具有良好的安全性和稳健性, 可以为矢量地图的版权保护提供技术参考。

关键词: 离散小波变换(DWT); 复数奇异值分解(CSVD); 嵌入域; 数字水印; 矢量地图

Vector map watermarking utilizing the ratio invariance of hybrid domain

Xi Xu¹, Qu Chengyi¹, Hou Xuan^{2,3}, Du Jinglong^{1*}

1. College of Geography Science and Geometrics Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China;
2. Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences,
Nanjing 210008, China; 3. Lakes-Basin Subcenter, National Earth System Science Data Center, Nanjing 210008, China

Abstract: Objective Traditional frequency domain-based vector map watermarking algorithms often embed watermarks by directly modifying transform coefficients, resulting in limited practicality due to unpredictable embedding locations and difficult-to-control embedding strengths. To address this issue, this paper explores the ratio of coefficients between discrete wavelet transform (DWT) and complex singular value decomposition (CSVD) as a new watermark embedding domain and proposes a robust vector map watermarking algorithm with controllable embedding strength by integrating coefficient amplification and quantization index modulation (QIM). Through the development of watermark embedding domain mining and

收稿日期: 2023-05-31; 修回日期: 2023-09-11; 预印本日期: 2023-09-18

* 通信作者: 杜景龙 jwuyue@163.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(42101420); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJCX22_1560)

Supported by: National Natural Science Foundation of China (42101420); Postgraduate Research & Practice Innovation Program of Jiangsu Province (SJCX22_1560)

watermark embedding method, the overall performance of the frequency domain watermarking for vector maps is enhanced, hence improving the practical utility of watermarking in vector maps. **Method** In the process of data preprocessing, the watermarking scheme uses the Douglas-Peucker algorithm to extract feature points from the vector map and constructs a complex sequence based on the feature points. The complex sequence is then subjected to a two-level DWT to obtain low-frequency coefficients (AC2) and high-frequency coefficients (DC2). On the basis of this approach, the singular values of AC2 and DC2 are calculated using CSVD, and the ratio of singular values is used as the watermark embedding domain. Theoretical analysis determined that the ratio can remain unaffected by geometric transformations of rotation, translation, and scaling, and has a high degree of robustness; likewise, the singular value is relatively stable and insensitive to changes in a few coordinate points. In the watermark embedding stage, the coefficient ratio is appropriately amplified (the amplified coefficient is 10^6 in this study), and the QIM method (the interval step size in QIM is set as 10 in this study) is used to modulate the amplified ratio of singular values to control the embedding error and achieve blind extraction of watermark information. **Result** We compared the proposed watermarking with three state-of-the-art saliency schemes, namely, DWT-CSVD mixed watermarking algorithm, single watermarking algorithm based on DWT, and the mixed watermarking algorithm based on discrete Fourier-transform frequency domain and spatial domain. After watermark information is embedded into various datasets with different watermarking algorithms, watermarked datasets are subjected to different degrees of geometric attacks, coordinate point attacks, clipping attacks, and combination attacks, and watermark information are extracted under various attack modes. Experimental results show that the proposed algorithm has good invisibility and comprehensive robustness. The difference between the original datasets and the watermarked datasets is difficult to perceive with the naked eye, and the greatest coordinate disturbance induced by watermark embedding is less than 3.92×10^{-3} , indicating a solid error control effect. Under various degrees of common geometric attacks, cropping, simplification, and coordinate point editing, the proposed watermarking algorithm can always extract the watermark images with an NC value of 1. Even under multiple attack modes involving multiple random combinations, the proposed algorithm is able to extract clearly identifiable watermark images. With the traditional frequency domain vector map watermarking approach, achieving such high performance would be challenging. **Conclusion** The proposed vector map watermarking algorithm exploits the ratio of multiple frequency transforms as the watermark embedding domain, which is secure and robust and can provide a technical reference for copyright protection of vector maps.

Key words: discrete wavelet transform (DWT); complex singular value decomposition (CSVD); embedding domain; digital watermarking; vector map

0 引言

作为测绘地理信息的重要基础数据,矢量地图应用广泛且附有昂贵的社会经济价值。互联网、云计算等技术的快速发展极大方便了矢量地图的传输和共享,但也带来了许多安全问题,如矢量地图的非法复制和倒卖(周成虎等,2020;奚旭等,2022)。数字水印作为信息安全领域的前沿技术,已经成为矢量地图安全共享和版权保护的有效技术手段(张黎明等,2016;朱长青等,2022)。

数字水印利用预设算法将版权信息嵌入宿主数据。在版权纠纷发生时,复现预设算法以提取这些隐藏的信息,并通过与原始嵌入信息进行比对实现版权认证(Erfani等,2017)。在当前研究中,综合考

虑水印信息的不可见性和水印算法的鲁棒性,挖掘合适的水印嵌入域一直是研究的重点方向。根据水印嵌入位置,矢量地图数字水印算法可分为空间域和频率域数字水印算法(Ren等,2021)。空间域数字水印算法通过直接修改坐标值的方式实现水印信息嵌入。Cox和de Jager(1992)最早提出在矢量地图空间域嵌入水印,算法通过直接编码坐标值的方式实现水印嵌入,尽管鲁棒性较差,但对后续研究很有意义。随着研究深入,许多学者在提升算法性能方面给出了更多的方案,也挖掘了更多的水印嵌入域。佟德宇等人(2018)利用相邻节点间的夹角作为水印嵌入域,并基于夹角在几何变换下的不变性特征,利用量化索引调制(quantization index modulation, QIM)的方式嵌入水印信息,最终实现如何攻击较强的鲁棒性。Peng等人(2018)首先提取矢量地图的

特征点,再将水印信息调制于特征点距离间的比值内,以此抵抗几何攻击和简化攻击。Ren 等人(2023)通过修改空间拓扑度量值嵌入水印信息,利用拓扑关系的稳定性保证了水印算法性能。总体而言,在当前矢量地图空间域水印算法研究中,各种几何特征或统计信息被挖掘出来作为水印嵌入域,并通过控制水印嵌入强度和嵌入方式实现良好的不可见性。但该类算法的水印信息仍直接隐藏在坐标中,易被针对性的攻击去除,因此其安全性和实用性往往较差(朱长青,2017)。

频率域水印算法先将坐标值从空间域转换至频率域,再通过修改频率域系数的方式嵌入水印信息,隐蔽性更强(Abubahia 和 Cocea,2017)。经典的频率域算法包括离散傅立叶变换(discrete Fourier transform, DFT)、离散小波变换(discrete wavelet transform, DWT)和离散余弦变换(discrete cosine transform, DCT)(Neyman 等,2014)。DFT 幅度和相位系数具有几何不变性,因此在矢量地图频率域水印算法设计中应用最为广泛(张黎明 等,2017;吕文清和张黎明,2018)。传统的做法是直接修改 DFT 幅度系数或相位系数嵌入水印信息,但受限于 DFT 系数的稳定性,无法抵抗旋转和缩放的组合攻击。此外,由于 DFT 是全局函数,其系数受到信号数量的影响较大,因此相关算法往往难以抵御顶点增加和删除攻击。Zhang 等人(2020)在 DFT 幅度和相位系数以及空间域中嵌入多重水印,算法可以抵抗几何攻击和顶点删除攻击,但对组合攻击鲁棒性较差。在不可见性方面,Xu 和 Wang(2010)的实验表明即使对 DFT 相位系数做微小改变也会对宿主矢量地图造成较大的扰动。为此,奚旭等人(2022)在水印嵌入过程中设计数据扰动控制措施,利用奇偶性判定规则实现水印嵌入的同时保证了水印的不可见性。DWT 将信号分解为低频系数和低频系数,弥补了 DFT 无法反映信号在时间的局部域频率特性的缺点。由于信号能量主要集中在低频系数,因此在 DWT 低频系数中嵌入水印信息可以有效抵抗噪声、格式转换等攻击,但对矢量地图保真度影响较大。在高频系数中嵌入水印信息对地图顶点扰动较小,但对顶点编辑攻击鲁棒性较弱(李媛媛和许录平,2004;Zope-Chaudhari 等,2017)。彭飞等人(2011)先对顶点引入对数极坐标映射(log-polar mapping,

LPM)得到几何特征不变量,再将水印信息嵌入至 DWT 高频系数中,在满足精度要求的同时提高了对几何攻击的鲁棒性。张艳群和王潜平(2010)权衡高频系数和低频系数的利弊,在两者中同时嵌入水印信息实现了算法鲁棒性和不可见性的平衡。奇异值分解(singular value decomposition, SVD)是一种特殊的矩阵变换,同样广泛应用于水印处理。Gaata(2018)对地图坐标进行 8×8 分组排序后做 SVD 变换,随后水印信息被嵌入至奇异向量中。该算法难以控制嵌入强度,且水印嵌入对地图保真度影响较大。Ren 等人(2022)选择 SVD 奇异值作为特征不变量,利用奇异值的稳定性和独立性嵌入水印,保证了算法良好的鲁棒性性能。王帅等人(2022)对坐标格网划分和归一化处理后做 SVD 变换,并将水印嵌入奇异值中。算法能够抵抗常见的几何攻击,但对裁剪攻击、顶点增加和删除攻击鲁棒性较弱。综上所述,矢量地图的频率域水印算法越来越受关注,但其算法特征决定了其在顶点的嵌入位置上具有很大的随机性,因此难以控制水印算法的不可见性。此外,频率域水印算法难以同时抵抗平移、旋转和缩放攻击。这些缺点限制了矢量地图频率域数字水印算法的实际应用能力。

鉴于此,本研究在探索频率域几何特征的基础上,寻找更适合矢量地图的水印嵌入域,以提升水印方案的综合性能。以 DWT 和复数奇异值分解(complex singular value decomposition, CSVD)算法为基础,挖掘出两者的频率域多重变换下系数的比值具有良好的几何不变性,利用该比值不变性设计了一种可同时抵抗多种攻击的矢量地图频率域水印算法。

1 DWT-CSVD 变换及几何性质

1.1 DWT-CSVD 变换和比值域构造

本研究中 DWT-CSVD 变换如图 1 所示,计算过程分为 3 步:1)对坐标复数序列做第 1 级离散小波变换,得到低频和高频系数;2)对高频系数做第 2 级离散小波变换,得到 2 级低频和高频系数;3)分别对 2 级低频和高频系数做 CSVD,得到奇异值和奇异向量。DWT-CSVD 变换系数比值不变性是指 DWT-CSVD 变换后所得的奇异值比值具有平移、旋转和

缩放不变性。

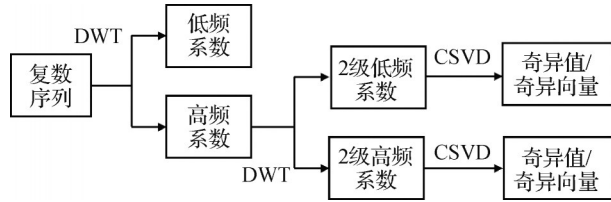


图1 DWT-CSVD变换

Fig. 1 DWT-CSVD transform

DWT-CSVD变换系数比值即为所提水印算法的水印嵌入域。首先需要根据式(1)构造坐标复数序列 $CP = \{cp_1, cp_2, \dots, cp_k, \dots, cp_n\}$, 具体为

$$cp_k = x_k + y_k i, k = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

式中, i 为虚数单位, (x_k, y_k) 表示第 k 个顶点的坐标值, n 表示顶点个数。对复数序列 CP 做 DWT 变换, 得到低频系数 AC 和高频系数 DC 。接着对 AC 再做一次 DWT 变换得到 2 级低频系数 $AC2$ 和 2 级高频系数 $DC2$ 。

将 $AC2$ 和 $DC2$ 分别构造为一维复数矩阵 Mat_{ac} 和 Mat_{dc} 并做 CSVD 变换, 具体为

$$Mat_{ac} = L_{ac} \times S_{ac} \times V_{ac}^H = L_{ac} \times s_{ac} \times V_{ac}^H \quad (2)$$

$$Mat_{dc} = L_{dc} \times S_{dc} \times V_{dc}^H = L_{dc} \times s_{dc} \times V_{dc}^H \quad (3)$$

式中, L_{ac} 和 V_{ac} 分别表示 Mat_{ac} 的左右奇异向量, V_{ac}^H 表示 V_{ac} 的 Hermite 矩阵, S_{ac} 表示奇异值矩阵。由于 Mat_{ac} 为一维矩阵, 因此 S_{ac} 只包含一个元素, 即 s_{ac} 。式(3)与式(2)的原理一致。

最后, DWT-CSVD 变换系数的比值 R 通过式(4)构造完成。具体为

$$R = \frac{S_{ac}}{S_{dc}} \quad (4)$$

1.2 DWT-CSVD 系数比值的几何性质

设 η 为偶数, 一维哈尔离散小波变换的矩阵因子 T_η 的定义为

$$T_\eta = \frac{\sqrt{2}}{2} \times \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ & & & \vdots & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & \dots & 0 & 0 \\ & & & \vdots & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

一维复数信号的 DWT 变换式为

$$T_\eta \times \begin{bmatrix} x_1 + y_1 i \\ x_2 + y_2 i \\ \vdots \\ x_\eta + y_\eta i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_{ac} \\ W_{dc} \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{2} \times \begin{bmatrix} (x_1 + x_2) + (y_1 + y_2)i \\ (x_3 + x_4) + (y_3 + y_4)i \\ \vdots \\ (x_{\eta-1} + x_\eta) + (y_{\eta-1} + y_\eta)i \\ (x_1 - x_2) + (y_1 - y_2)i \\ (x_3 - x_4) + (y_3 - y_4)i \\ \vdots \\ (x_{\eta-1} - x_\eta) + (y_{\eta-1} - y_\eta)i \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, DWT 的低频系数 W_{ac} 和高频系数 W_{dc} 分别为所得结果矩阵的上半区域和下半区域。

1) 平移不变性。将地图沿 X 轴和 Y 轴分别平移 α 和 β 个单位, 再对坐标复数序列做 DWT, 结果如式(7)所示, 具体为

$$\begin{bmatrix} W_{ac_{\alpha\beta}} \\ W_{dc_{\alpha\beta}} \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{2} \times \begin{bmatrix} (x_1 + x_2 + 2\alpha) + (y_1 + y_2 + 2\beta)i \\ (x_3 + x_4 + 2\alpha) + (y_3 + y_4 + 2\beta)i \\ \vdots \\ (x_{\eta-1} + x_\eta + 2\alpha) + (y_{\eta-1} + y_\eta + 2\beta)i \\ (x_1 - x_2) + (y_1 - y_2)i \\ (x_3 - x_4) + (y_3 - y_4)i \\ \vdots \\ (x_{\eta-1} - x_\eta) + (y_{\eta-1} - y_\eta)i \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中, $W_{ac_{\alpha\beta}}$ 和 $W_{dc_{\alpha\beta}}$ 分别表示地图经过平移变换后的低频系数和高频系数。显然, 平移变换后, DWT 高频系数保持不变。因此, 对高频系数再做一次 DWT, 得到二级低频系数与高频系数间的奇异值的比值也将保持不变。

2) 缩放不变性。对矢量地图缩放 $\gamma (\gamma > 0)$, 再对坐标复数序列进行 DWT 变换, 结果如式(8)所示, 具体为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{W}_{ac_\gamma} \\ \mathbf{W}_{dc_\gamma} \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}\gamma}{2} \begin{bmatrix} (x_1 + x_2) + (y_1 + y_2)i \\ (x_3 + x_4) + (y_3 + y_4)i \\ \vdots \\ (x_{\eta-1} + x_\eta) + (y_{\eta-1} + y_\eta)i \\ (x_1 - x_2) + (y_1 - y_2)i \\ (x_3 - x_4) + (y_3 - y_4)i \\ \vdots \\ (x_{\eta-1} - x_\eta) + (y_{\eta-1} - y_\eta)i \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中, $\mathbf{W}_{ac_\gamma}$ 和 $\mathbf{W}_{dc_\gamma}$ 分别表示地图经过缩放变换后的低频系数和低频系数。结果表明, 经过空间缩放 γ 倍后, DWT 高频和低频系数值也相应地缩放了 γ 倍。

定义一维复数矩阵为 $\mathbf{MC}_{\eta \times 1}$, 则其奇异值计算式为

$$s_{mc} = \sqrt{\lambda_{mc}} \quad (9)$$

式中, s_{mc} 表示矩阵 $\mathbf{MC}$ 的奇异值, λ_{mc} 表示矩阵 $\mathbf{MC}^H \times \mathbf{MC}$ 的特征值。定义矩阵 $\mathbf{MC2} = \gamma \times \mathbf{MC}$ 并求解奇异值, 可得

$$s_{mc2} = \gamma \times s_{mc} \quad (10)$$

式中, s_{mc2} 为矩阵 $\mathbf{MC2}$ 的奇异值。结合式(9)和式(10)可知, 经过 γ 倍缩放, 奇异值也相应地缩放了 γ 倍。因此, 缩放变换后, 低频系数和高频系数的奇异值比值保持不变。

3) 旋转不变性。将矢量地图以 $(0, 0)$ 为中心点旋转 θ , 再对坐标复数序列做 DWT, 结果式(1)所示, 具体为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{W}_{ac_\theta} \\ \mathbf{W}_{dc_\theta} \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} (x_1 + x_2) \times \cos \theta - (y_1 + y_2) \times \sin \theta + \{(x_1 + x_2) \times \sin \theta + (y_1 + y_2) \times \cos \theta\}i \\ (x_3 + x_4) \times \cos \theta - (y_3 + y_4) \times \sin \theta + \{(x_3 + x_4) \times \sin \theta + (y_3 + y_4) \times \cos \theta\}i \\ \vdots \\ (x_{\eta-1} + x_\eta) \times \cos \theta - (y_{\eta-1} + y_\eta) \times \sin \theta + \{(x_{\eta-1} + x_\eta) \times \sin \theta + (y_{\eta-1} + y_\eta) \times \cos \theta\}i \\ (x_1 - x_2) \times \cos \theta - (y_1 - y_2) \times \sin \theta + \{(x_1 - x_2) \times \sin \theta + (y_1 - y_2) \times \cos \theta\}i \\ (x_3 - x_4) \times \cos \theta - (y_3 - y_4) \times \sin \theta + \{(x_3 - x_4) \times \sin \theta + (y_3 - y_4) \times \cos \theta\}i \\ \vdots \\ (x_{\eta-1} - x_\eta) \times \cos \theta - (y_{\eta-1} - y_\eta) \times \sin \theta + \{(x_{\eta-1} - x_\eta) \times \sin \theta + (y_{\eta-1} - y_\eta) \times \cos \theta\}i \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中, $\mathbf{W}_{ac_\theta}$ 和 $\mathbf{W}_{dc_\theta}$ 分别表示地图经过旋转变换后的低频系数和高频系数。

求解 $\mathbf{W}_{ac_\theta}$ 和 $\mathbf{W}_{dc_\theta}$ 的奇异值, 结果如式(12)和式(13)所示, 具体为

$$s1 = \frac{\sqrt{2}}{2} \times \sqrt{\sum_{k=1}^{\frac{\eta}{2}} (x_{2k-1} + x_{2k})^2 + (y_{2k-1} + y_{2k})^2} \quad (12)$$

$$s2 = \frac{\sqrt{2}}{2} \times \sqrt{\sum_{k=1}^{\frac{\eta}{2}} (x_{2k-1} - x_{2k})^2 + (y_{2k-1} - y_{2k})^2} \quad (13)$$

式中, $s1$ 和 $s2$ 为计算所得奇异值。对旋转前的矩阵做同样的计算, 可知奇异值比值经过空间旋转后仍然保持不变。

综上所述, 矢量地图经过空间平移、缩放和旋转后, 其 DWT-CSVD 变换系数的奇异值比值保持不变。

2 水印嵌入与检测模型

本研究所提 DWT-CSVD 变换系数的比值具有平移、旋转和缩放不变性。鉴于此, 本文利用 QIM 将水印信息调制于系数比值以期获得对于几何攻击的鲁棒性; 在水印嵌入阶段采用系数放大法以增强水印的不可见性。

2.1 水印嵌入模型

1) 以线或面要素为单位, 利用改进道格拉斯—普克算法(Peng等, 2018)提取特征点, 根据式(1)构建复数序列 $\mathbf{CP}$ 。

2) 对 $\mathbf{CP}$ 进行 DWT-CSVD 变换, 得到高频系数奇异值、低频系数奇异值以及奇异值比值, 分别记做 s_{ac} , s_{dc} , R 。

3) 为增强水印安全性, 对水印二值图($\mathbf{W}$)做 Arnold 加密(Shang等, 2008)。加密水印图记做 $\mathbf{W}_e$ 。

4) 利用 QIM 嵌入水印信息。为了提高不可见性, 需将比值 R 放大, 计算水印索引 idx , 并将水印信息调制于 R 中, 具体为

$$idx = \text{mod}(M \times R, l) \quad (14)$$

$$R' = \begin{cases} \frac{M \times R + Q}{M}, \mathbf{W}_e(idx) = 1 & \text{mod}(M \times R, 2Q) \leq Q \\ \frac{M \times R + Q}{M}, \mathbf{W}_e(idx) = 0 & \text{mod}(M \times R, 2Q) > Q \end{cases} \quad (15)$$

式中, l 表示水印长度, M 表示放大倍数, Q 为 QIM 的

步长, M 和 Q 通过实验确定, R' 表示嵌入水印后的奇异比值。

5) 由 R' 和 s_{dc} 计算嵌入水印后的低频系数奇异值 s'_{ac} , 具体为

$$s'_{ac} = R' \times s_{dc} \tag{16}$$

6) 以 s'_{ac} 替换原奇异值, 通过逆复数奇异值分解得到含水印的二级低频系数; 通过逆离散小波变换得到嵌入水印的复数序列; 提取复数序列的实部和虚部, 替换原始特征点得到嵌入水印的矢量地图。

2.2 水印检测模型

1) 以线或面要素为单位, 提取特征点, 构造复数序列, 再对复数序列做 DWT-CSVD 变换, 得到奇异比值 $R2$ 。

2) 提取水印索引值 ($idx2$) 和像素值 (pix) 并记录, 具体为

$$idx2 = \text{mod}(M \times R2, l) \tag{17}$$

$$pix = \begin{cases} 0 & \text{mod}(M \times R2, 2Q) \leq Q \\ 1 & \text{mod}(M \times R2, 2Q) > Q \end{cases} \tag{18}$$

3) 重复步骤 1) 和 2), 直至所有要素的水印信息提取完毕。

4) 由于水印图中的像素被多次嵌入至矢量地图中, 因此通过比较每个索引值下不同像素值的数量确定最终像素值。计算方法为

$$W'_e(id) = \begin{cases} 0 & Num_0 \geq Num_1 \\ 1 & Num_0 < Num_1 \end{cases} \tag{19}$$

式中, id 表示索引值, Num_0 和 Num_1 分别表示索引为 id 时, 像素值为 0 和 1 个数, W'_e 为加密水印图像。

5) 以密钥 key 为条件, 通过逆 Arnold 算法对 W'_e 解密, 得到最终水印图 W' 。利用归一化相关系数 (normalized correlation, NC) (肖振久 等, 2017) 来衡量提取版权图 W' 与原始版权图 W 间的相似度。

3 仿真实验

3.1 实验数据

实验选择 3 组矢量地图, 嵌入水印后进行误差统计, 并在多种类型攻击下分析了算法鲁棒性。如图 2 所示, 所选矢量地图分别为行政区划、道路和河流数据。矢量地图详细信息如表 1 所示。图 3(a) 为实验所采用的二值水印图, 长度为 20×20 。Arnold 加密后的水印图如图 3(b) 所示。

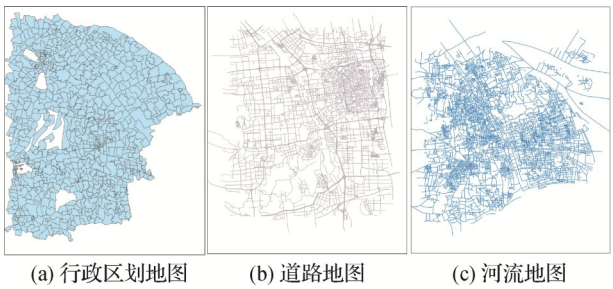


图 2 测试矢量地图

Fig. 2 Test vector maps ((a) administrative division map; (b) road map; (c) river map)

表 1 测试数据详情表

Table 1 Detail of experimental data

图层	类型	要素数	顶点数
行政区划	面	924	429 463
道路	线	8 597	36 724
河流	线	7 027	135 185

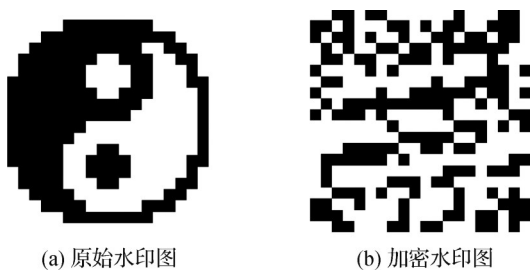


图 3 水印图像

Fig. 3 Watermark ((a) original watermark; (b) encrypted watermark)

3.2 不可见性分析

选择最大误差、平均误差和均方根误差作为水印算法不可见性的评价指标。实验设置放大系数 M 为 10^6 , 步长 Q 为 10。误差统计结果如表 2 所示。结果显示, 水印嵌入造成的最大误差被控制在毫米级, 并且平均误差和均方根误差均接近于 0。

图 4 展示了水印嵌入后的道路地图与原始地图

表 2 不可见性实验结果

Table 2 Experimental results of invisibility

				/m
图层	最大误差	平均误差	均方根误差	
行政区划	6.81×10^{-3}	1.80×10^{-5}	1.43×10^{-4}	
道路	4.53×10^{-3}	3.26×10^{-5}	2.97×10^{-4}	
河流	3.92×10^{-3}	1.61×10^{-5}	1.15×10^{-4}	

的叠加效果。从图 4 可以看出,只有经过较大程度的放大才可以视觉感知到两组数据的差异。综合表 2 和图 4 可知,所提水印算法具有优异的不可见性。

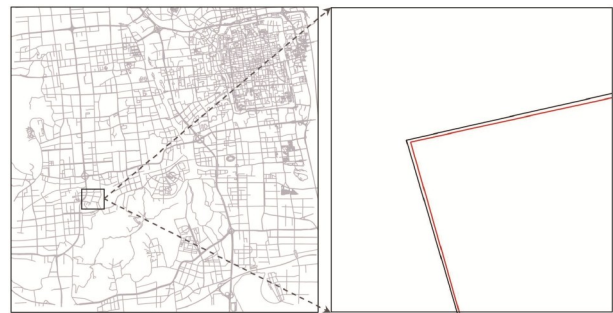


图 4 嵌入水印的河流数据与原始河流数据间的
叠加和细节放大图

Fig. 4 Overlay and detail enlargement between
the embedded and original road maps

3.3 鲁棒性分析

3.3.1 几何攻击

旋转、缩放和平移(rotation, scaling, and translation, RST)是非常典型的 3 种几何攻击方式,也是矢量地图在实际应用中常遇到的数据编辑操作。实验对数据做不同程度的旋转、平移和缩放以及组合这 3 种攻击并提取水印。以河流数据为例,所提算法与对比算法(Qu 等, 2022; Zhang 等, 2020; Gaata, 2018)的水印提取结果见表 3。结果显示,在不同程度的旋转、平移、缩放及其组合攻击下,所提算法均能提取出完全准确的水印图;Qu 等人(2022)算法能在旋转和平移攻击下提取 NC 值为 1 的水印图;Zhang 等人(2020)所提算法虽然可抵抗旋转、平移、缩放攻击,但在组合几何攻击下无法提取出正确的水印;Gaata(2018)的算法仅能

表 3 几何攻击实验结果

Table 3 Experimental results of geometric attacks

攻击类型	幅度	本文	Qu 等人(2022)	Zhang 等人(2020)	Gaata(2018)
旋转	10°	 NC = 1	 NC = 1	 NC = 1	 NC = 0.43
	110°	 NC = 1	 NC = 1	 NC = 1	 NC = 0.43
	210°	 NC = 1	 NC = 1	 NC = 1	 NC = 0.43
缩放	0.7 倍	 NC = 1	 NC = 0.49	 NC = 1	 NC = 1
	1.3 倍	 NC = 1	 NC = 0.54	 NC = 1	 NC = 1
	1.9 倍	 NC = 1	 NC = 0.53	 NC = 1	 NC = 1
平移	10 m	 NC = 1	 NC = 1	 NC = 1	 NC = 1
	20 m	 NC = 1	 NC = 1	 NC = 1	 NC = 1
	500 m	 NC = 1	 NC = 1	 NC = 1	 NC = 0.43
组合几何攻击	10°, 0.7, 10 m	 NC = 1	 NC = 0.50	 NC = 0.46	 NC = 0.43
	110°, 1.3, 20 m	 NC = 1	 NC = 0.51	 NC = 0.49	 NC = 0.43
	210°, 1.9, 500m	 NC = 1	 NC = 0.52	 NC = 0.55	 NC = 0.43

抵抗旋转和小幅度的平移攻击。结果表明,所提算法完全能够抵抗 RST 攻击,且性能优于对比算法。

3.3.2 简化攻击

简化攻击实验结果如表 4 所示。由于本文算法和 Qu 等人(2022)的算法均将水印嵌入至特征点中,因此算法能够有效地抵抗简化攻击。Zhang 等人(2020)在频率域和空间域中同时嵌入水印,而空间域的水印能较好地抵抗简化攻击。Gaata(2018)的

算法能够在 5% 的简化率下提取出较为清晰的水印图像,但当简化率为 30% 和 50% 时,该算法无法提取出正确的水印图。实验结果表明,所提算法对简化攻击具有较强的鲁棒性。

3.3.3 增点攻击

增点攻击实验结果如图 5 所示。所提算法及 Qu 等人(2022)、Zhang 等人(2020)的算法在 90% 增加比例下仍可提取出 NC 值为 1 的水印图;Gaata(2018)

表 4 地图简化攻击实验结果
Table 4 Experimental results of simplification attacks

简化率/%	图层	本文	Qu 等人(2022)	Zhang 等人(2020)	Gaata(2018)
5	行政区划	 NC = 1	 NC = 1	 NC = 1	 NC = 0.93
	道路	 NC = 1	 NC = 1	 NC = 1	 NC = 0.97
	河流	 NC = 1	 NC = 1	 NC = 1	 NC = 0.92
30	行政区划	 NC = 1	 NC = 1	 NC = 1	 NC = 0.60
	道路	 NC = 1	 NC = 1	 NC = 1	 NC = 0.82
	河流	 NC = 1	 NC = 1	 NC = 1	 NC = 0.76
50	行政区划	 NC = 1	 NC = 1	 NC = 1	 NC = 0.62
	道路	 NC = 1	 NC = 1	 NC = 1	 NC = 0.59
	河流	 NC = 1	 NC = 1	 NC = 1	 NC = 0.53

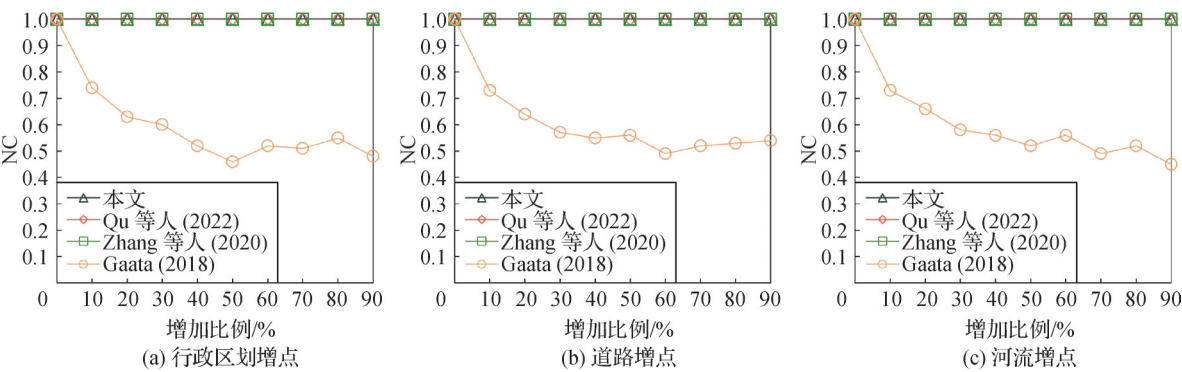


图 5 顶点增加攻击实验结果

Fig. 5 Experimental results of vertex addition attacks ((a) vertex addition of the administrative division map; (b) vertex addition of the road map; (c) vertex addition of the river map)

的算法在增点比例为 10% 的条件下提取的水印图 NC 值不超过 0.8, 且随着增点比例变大, NC 值呈变小的趋势。由于增加的顶点作为非特征点, 并不参与水印提取, 因此本算法能够抵抗任意比例的顶点增加攻击。Gaata(2018)算法的水印提取受到顶点数量影响较大, 因此对顶点增加攻击鲁棒性较差。

3.3.4 删点攻击

由于 NC 值大于 0.85 时可通过视觉分辨出版权所属, 因此将 0.85 设为阈值, 即 NC 值大于 0.85 则视做水印提取成功。图 6 给出了删点攻击实验结果。

当删点比例小于 16% 时, 所提算法和 Qu 等人(2022)算法可提取出 NC 值大于 0.85 的水印图; Zhang 等人(2020)算法在 28% 的删点比例下仍能提取出 NC 值为 1 的水印图; Gaata(2018)仅能在 2% 的删点比例下成功提取水印。由于删除比率过高将会严重影响矢量地图精度, 因此在合理的删点攻击范围内, 所提算法具备鲁棒性。

3.3.5 裁剪攻击

对含水印的矢量地图分别裁剪 1/8、1/4、1/2 区域后提取水印, 结果如表 5。由于本文及 Qu 等人

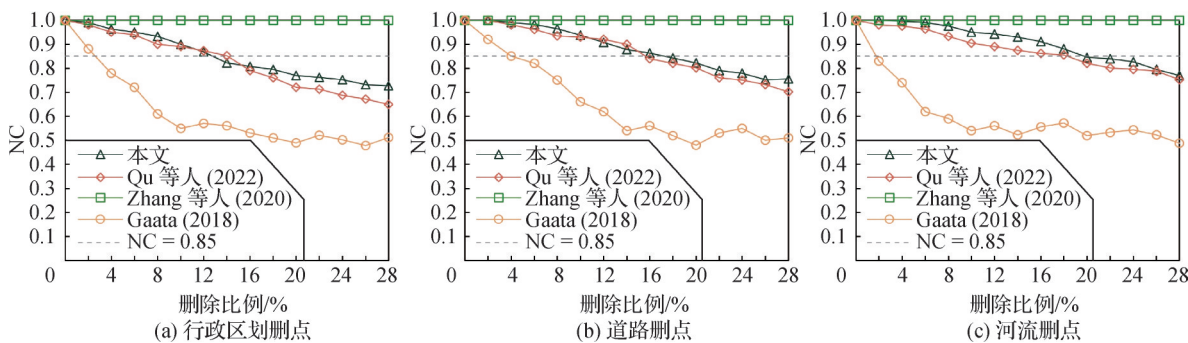


图 6 顶点删除攻击实验结果

Fig. 6 Experimental results of vertex deletion attacks ((a) vertex deletion of administrative division map; (b) vertex deletion of road map; (c) vertex deletion of river map)

表 5 裁剪攻击实验结果

Table 5 Experimental results of map cropping attacks

裁剪面积	图层	本文	Qu 等人 (2022)	Zhang 等人 (2020)	Gaata(2018)
1/8	行政区划	 NC = 1	 NC = 1	 NC = 1	 NC = 1
	道路	 NC = 1	 NC = 1	 NC = 1	 NC = 1
	河流	 NC = 1	 NC = 1	 NC = 1	 NC = 1
1/4	行政区划	 NC = 1	 NC = 1	 NC = 1	 NC = 0.55
	道路	 NC = 1	 NC = 1	 NC = 1	 NC = 0.57
	河流	 NC = 1	 NC = 1	 NC = 1	 NC = 0.51
1/2	行政区划	 NC = 1	 NC = 1	 NC = 1	 NC = 0.56
	道路	 NC = 1	 NC = 1	 NC = 1	 NC = 0.44
	河流	 NC = 1	 NC = 1	 NC = 1	 NC = 0.51

(2022)、Zhang 等人(2020)的算法均以实体要素为嵌入单位,因此在 1/8、1/4 和 1/2 的裁剪攻击下均能提取出准确的水印图。Gaata(2018)的算法在裁剪 1/8 区域时可以提取出正确的水印信息,但随着裁剪面积变大,提取的水印的 NC 值无法超过 0.6。结果表明,所提算法能够有效地抵抗地图裁剪攻击。

3.3.6 组合攻击

为了验证所提算法对组合攻击的鲁棒性,将

1.5 倍放大(a1),10% 简化(a2),1/8 裁剪(a3)相互组合形成新的攻击方式。组合攻击实验结果如表 6 所示。结果显示,所提算法在 3 种攻击方式的任意组合攻击中均能够提取出 NC 为 1 的水印图。Qu 等人(2022)和 Zhang 等人(2020)的算法只能从简化和裁剪的组合攻击中提取中正确的水印信息。Gaata(2018)的算法仅能抵抗缩放和裁剪的组合攻击。结果表明,所提算法对于组合攻击的鲁棒性强于对比算法。

表 6 组合攻击实验结果
Table 6 Experimental results of compound attacks

组合方式	图层	本文	Qu 等人(2022)	Zhang 等人(2020)	Gaata(2018)
a1, a2	行政区划	NC = 1 (√)	NC = 0.63 (×)	NC = 0.52 (×)	NC = 0.49 (×)
	道路	NC = 1 (√)	NC = 0.52 (×)	NC = 0.47 (×)	NC = 0.55 (×)
	河流	NC = 1 (√)	NC = 0.56 (×)	NC = 0.53 (×)	NC = 0.51 (×)
a1, a3	行政区划	NC = 1 (√)	NC = 0.54 (×)	NC = 0.57 (×)	NC = 1 (√)
	道路	NC = 1 (√)	NC = 0.51 (×)	NC = 0.56 (×)	NC = 1 (√)
	河流	NC = 1 (√)	NC = 0.55 (×)	NC = 0.52 (×)	NC = 1 (√)
a2, a3	行政区划	NC = 1 (√)	NC = 1 (√)	NC = 1 (√)	NC = 0.52 (×)
	道路	NC = 1 (√)	NC = 1 (√)	NC = 1 (√)	NC = 0.46 (×)
	河流	NC = 1 (√)	NC = 1 (√)	NC = 1 (√)	NC = 0.51 (×)
a1, a2, a3	行政区划	NC = 1 (√)	NC = 0.48 (×)	NC = 0.49 (×)	NC = 0.53 (×)
	道路	NC = 1 (√)	NC = 0.55 (×)	NC = 0.51 (×)	NC = 0.53 (×)
	河流	NC = 1 (√)	NC = 0.47 (×)	NC = 0.48 (×)	NC = 0.47 (×)

注:“×”表示水印提取失败,“√”表示成功;a1 表示 1.5 倍放大,a2 表示 10% 简化,a3 表示 1/8 裁剪。

4 讨论与分析

目前,矢量地图的频率域数字水印算法的研究较为丰富,但往往鲁棒性不够全面,难以抵抗一系列的复杂攻击。为了弥补这一缺陷,本研究结合 DWT 高频系数的平移不变性、SVD 奇异值的旋转不变性和缩放不变性,采用不同频率域算法优势互补的策略,针对矢量地图设计了一种融合多种数学变换的混合域数字水印算法。

相较于已有的频率域水印算法,本文算法在鲁棒性和不可见性方面有所改进,这归因于本文算法选用的多种数学变换具有鲁棒性互补的优势,且能够设置合适的水印嵌入强度。考虑到水印信息的安全性,本研究采用当前较为流行的 Arnold 置乱算法

对水印图像进行置乱加密,在密钥不公开的情况下,攻击者无法轻易地破解水印信息。本文算法水印加密方式具有可升级替换性,即在具有更可靠的加密算法条件下,可以通过替换 Arnold 算法达到更高的水印安全性。由于本文算法对矢量地图坐标序列进行了多步频率域变换,因此势必会增加程序的运行时间和占用空间,但随着计算机性能的提高,这种差距将会越来越小。另外,时间与空间成本的增加服务于水印算法的鲁棒性,而矢量地图具有昂贵的经济价值,因此认为消耗额外时间和空间成本是值得的。在可拓展性方面,本文算法除了能够应用于矢量地图外,还可应用于一般的矢量图像,例如可缩放矢量图形(scalable vector graphics,SVG)格式的图像数据,此类数据同样是由坐标序列构造而成,可以通过设置合适的简化阈值及嵌入强度实现水印信息的

嵌入。

融合多种数学变换优势的混合域矢量地图数字水印较为明显地改进了传统单一变换域矢量地图水印算法的鲁棒性, 为提高矢量地图水印算法性能提供了一种可靠思路。目前, 频率域变换中的DFT和DCT等算法均很成熟, 随着研究的持续深入, 可结合DFT和DCT等探索 and 构建更加多样的混合域矢量地图数字水印算法。

5 结 论

本研究对矢量地图的频率域变换进行了更深层次的探索, 结合DWT和CSVD挖掘出频率系数比值在几何变换下具有非常稳定的特性, 并以此为水印嵌入域, 设计了一种鲁棒性水印方案。算法事先通过道格拉斯—普克算法提取特征点, 利用特征点复数序列计算DWT-CSVD系数比值, 以此来抵抗简化和几何攻击。在水印嵌入阶段, 利用量化索引调制与系数放大法有效地控制了水印嵌入造成的误差。实验证明所提算法相较于对比算法具备更优异的不可见性和更全面的鲁棒性, 尤其是对平移、旋转和缩放及其组合攻击具有强鲁棒性, 弥补了传统频率域水印算法无法同时抵抗平移、旋转和缩放攻击的缺点。此外, 所提算法还能够从简化、裁剪和顶点增加等攻击下提取出可靠的水印图像。

尽管结合DWT-CSVD系数比值的几何不变性和特征点的稳定性为所提算法提供了较强的鲁棒性, 但由于频率域变换的全局性, 在输入信号的数量发生改变后频域系数受到较大扰动, 因此所提算法对删点攻击的鲁棒性仍有一定的差距。此外, 本文所提DWT-CSVD比值嵌入域是在DWT的高频系数中所创建的, 因此对噪声攻击的抵抗性较差。

本研究所提DWT-CSVD系数比值不变性为矢量地图数字水印提供了新的算法思路, 在后续研究中, 将继续挖掘频率域变换的数学现象, 寻找性能更好的鲁棒性算法, 并且加强对噪声攻击、删点攻击及水印容量方面的改善工作, 以期更加全面地提升矢量地图频率域水印算法的性能。

参考文献 (References)

Abubahia A and Cocea M. 2017. Advancements in GIS map copyright

protection schemes — a critical review. *Multimedia Tools and Applications*, 76(10): 12205-12231 [DOI: 10.1007/s11042-016-3441-z]

Cox G S and de Jager G. 1992. A survey of point pattern matching techniques and a new approach to point pattern recognition//*Proceedings of 1992 South African Symposium on Communications and Signal Processing*. Cape Town, South Africa: IEEE: 243-248 [DOI: 10.1109/COMSIG.1992.274276]

Erfani Y, Pichevar R and Rouat J. 2017. Audio watermarking using spikegram and a two-dictionary approach. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 12(4): 840-852 [DOI: 10.1109/TIFS.2016.2636094]

Gaata M T. 2018. Robust watermarking scheme for GIS vector maps. *Ibn AL-Haitham Journal for Pure and Applied Sciences*, 31(1): 277-284 [DOI: 10.30526/31.1.1835]

Li Y Y and Xu L P. 2004. Vector graphical objects watermarking scheme in wavelet domain. *Acta Photonica Sinica*, 33(1): 97-100 (李媛媛, 许录平. 2004. 矢量图形中基于小波变换的盲水印算法. 光子学报, 33(1): 97-100)

Lyu W Q and Zhang L M. 2018. A DFT-based zero-watermarking algorithm for vector geodata. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 35(1): 94-98, 104 (吕文清, 张黎明. 2018. 运用DFT的矢量地理数据零水印算法. 测绘科学技术学报, 35(1): 94-98), 104) [DOI: 10.3969/j.issn.1673-6338.2018.01.018]

Neyman S N, Pradnyana I N P and Sitohang B. 2014. A new copyright protection for vector map using FFT-based watermarking. *Telkomnika*, 12(2): 367-378 [DOI: 10.12928/telkomnika.v12i2.49]

Peng F, Lei Y Z and Sun X M. 2011. Reversible watermarking algorithm in wavelet domain for 2D CAD engineering graphics. *Journal of Image and Graphics*, 16(7): 1134-1139 (彭飞, 雷瑜洲, 孙星明. 2011. 2维CAD工程图小波域可逆水印. 中国图象图形学报, 16(7): 1134-1139) [DOI: 10.11834/jig.20110720]

Peng Y W, Lan H, Yue M L and Xue Y. 2018. Multipurpose watermarking for vector map protection and authentication. *Multimedia Tools and Applications*, 77(6): 7239-7259 [DOI: 10.1007/s11042-017-4631-z]

Qu C Y, Xi X, Du J L and Wu T. 2022. Robust watermarking scheme for vector geographic data based on the ratio invariance of DWT-CSVD coefficients. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 11(12): #583 [DOI: 10.3390/ijgi11120583]

Ren N, Guo S T, Zhu C Q and Hu Y C. 2023. A zero-watermarking scheme based on spatial topological relations for vector dataset. *Expert Systems with Applications*, 226: #120217 [DOI: 10.1016/j.eswa.2023.120217]

Ren N, Tong D Y, Cui H C, Zhu C Q and Zhou Q F. 2022. Congruence and geometric feature-based commutative encryption-watermarking method for vector maps. *Computers and Geosciences*, 159: #105009 [DOI: 10.1016/j.cageo.2021.105009]

Ren N, Zhao Y Z, Zhu C Q, Zhou Q F and Xu D J. 2021. Copyright protection based on zero watermarking and blockchain for vector maps.

- ISPRS International Journal of Geo-Information, 10 (5): #294 [DOI: 10.3390/ijgi10050294]
- Shang Z W, Ren H E and Zhang J. 2008. A block location scrambling algorithm of digital image based on Arnold transformation//Proceedings of the 9th International Conference for Young Computer Scientists. Hunan, China: IEEE: 2942-2947 [DOI: 10.1109/ICYCS.2008.99]
- Tong D Y, Zhu C Q and Ren N. 2018. Watermarking algorithm applying to small amount of vector geographical data. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 47(11): 1518-1525 (佟德宇, 朱长青, 任娜. 2018. 小数据量矢量地理数据水印算法. *测绘学报*, 47(11): 1518-1525) [DOI: 10.11947/j.AGCS.2018.20170741]
- Wang S, Zhang L M, Li Y, Qin R Z and Zhang Q H. 2022. A zero watermarking algorithm of vector geographic data using singular value decomposition. *Science of Surveying and Mapping*, 47(11): 196-203, 222 (王帅, 张黎明, 李玉, 秦如贞, 张启航. 2022. 运用奇异值分解的矢量地理数据零水印算法. *测绘科学*, 47(11): 196-203, 222) [DOI: 10.16251/j.cnki.1009-2307.2022.11.024]
- Xi X, Zhang X C, Bao J T and Zhang Y Z. 2022. Watermarking algorithm for vector maps based on improved DFT and QR code. *Science of Surveying and Mapping*, 47(10): 190-197 (奚旭, 张新长, 鲍建腾, 张亚洲. 2022. 一种改进 DFT 和 QR 码的矢量地图数字水印算法. *测绘科学*, 47(10): 190-197) [DOI: 10.16251/j.cnki.1009-2307.2022.10.025]
- Xiao Z J, Zhang H, Chen H and Gao T. 2017. Zero-watermarking based on boost normed singular value decomposition and cellular neural network. *Journal of Image and Graphics*, 22(3): 288-296 (肖振久, 张晗, 陈虹, 高婷. 2017. 增强奇异值分解和细胞神经网络的零水印. *中国图象图形学报*, 22(3): 288-296) [DOI: 10.11834/jig.20170302]
- Xu D H and Wang Q S. 2010. The study of watermarking algorithm for vector geospatial data based on the phase of DFT//Proceedings of 2010 IEEE International Conference on Wireless Communications, Networking and Information Security. Beijing, China: IEEE: 625-629 [DOI: 10.1109/WCINS.2010.5541855]
- Zhang L M, Yan H W and Lyu W Q. 2017. A blind watermarking algorithm robust to projection attacks for vector data. *Remote Sensing Information*, 32(1): 175-180 (张黎明, 闫浩文, 吕文清. 2017. 一种抗投影攻击的矢量空间数据盲水印算法. *遥感信息*, 32(1): 175-180) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-3177.2017.01.029]
- Zhang L M, Yan H W, Qi J X and Zhang Y Z. 2016. Feature points based blind watermarking approach for vector data. *Science of Surveying and Mapping*, 41(4): 184-189 (张黎明, 闫浩文, 齐建勋, 张永忠. 2016. 运用特征点的矢量空间数据盲水印算法. *测绘科学*, 41(4): 184-189) [DOI: 10.16251/j.cnki.1009-2307.2016.04.036]
- Zhang L M, Yan H W, Zhu R and Du P. 2020. Combinational spatial and frequency domains watermarking for 2D vector maps. *Multimedia Tools and Applications*, 79(41): 31375-31387. [DOI: 10.1007/s11042-020-09573-3]
- Zhang Y Q and Wang Q P. 2010. Complementary watermarking algorithm of vector map based on discrete wavelet transform. *Journal of Computer Applications*, 30(S2): 110-111, 115 (张艳群, 王潜平. 2010. 基于离散小波变换的互补矢量地图数字水印算法. *计算机应用*, 30(S2): 110-111, 115)
- Zhou C H, Sun J L, Su F Z, Yang X M, Pei T, Ge Y, Yang Y P, Zhang A, Liao X H, Lu F, Gao X and Fu D J. 2020. Geographic information science development and technological application. *Acta Geographica Sinica*, 75(12): 2593-2609 (周成虎, 孙九林, 苏奋振, 杨晓梅, 裴韬, 葛咏, 杨雅萍, 张岸, 廖小罕, 陆锋, 高星, 付东杰. 2020. 地理信息科学发展与技术应用. *地理学报*, 75(12): 2593-2609) [DOI: 10.11821/dlxb202012004]
- Zhu C Q. 2017. Research progresses in digital watermarking and encryption control for geographical data. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 46(10): 1609-1619 (朱长青. 2017. 地理数据数字水印和加密控制技术进展. *测绘学报*, 46(10): 1609-1619) [DOI: 10.11947/j.AGCS.2017.20170301]
- Zhu C Q, Ren N and Xu D J. 2022. Geo-information security technology: progress and prospects. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 51(6): 1017-1028 (朱长青, 任娜, 徐鼎捷. 2022. 地理信息安全技术研究进展与展望. *测绘学报*, 51(6): 1017-1028) [DOI: 10.11947/j.AGCS.2022.20220172]
- Zope-Chaudhari S, Venkatachalam P and Buddhiraju K M. 2017. Copyright protection of vector data using vector watermark//Proceedings of 2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Fort Worth, USA: IEEE: 6110-6113 [DOI: 10.1109/IGARSS.2017.8128403]

作者简介

奚旭,男,讲师,主要研究方向为地理信息安全与防护。

E-mail: xixu@mail.usts.edu.cn

杜景龙,通信作者,男,教授,主要研究方向为地理信息系统设计与应用、空间信息安全与防护。

E-mail: jwuyue@163.com

瞿成意,男,硕士研究生,主要研究方向为地理空间数据版权保护研究。E-mail: quchengyi2022@163.com

侯渲,男,工程师,主要研究方向科学数据共享。

E-mail: xhou@niglas.ac.cn