

复合的海图安全防护技术研究

徐锋¹, 李佳楠¹, 孙建国^{1,2}

(1. 哈尔滨工程大学计算机科学与技术学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 中国科学院信息工程研究所, 北京 100089)

摘要:提出了一种二维电子海图自适应水印技术,利用平移不变策略,获得海图空间内频域较稳定的一个水印嵌入载体集合。为了防止水印嵌入幅度过大而影响海图使用和从水印算法的安全性考虑,提出了灰度平衡控制方案,计算每个划分好的矩形区域内可嵌入水印的最大容量。实验表明,该方法能够适应海图常规操作所带来的数据扰动,具有较好的顽健性。

关键词:信息隐藏;数字水印;电子海图;自适应性

中图分类号:TP309

文献标识码:A

Research of composite safety protection for digital maps

XU Feng¹, LI Jia-nan¹, SUN Jian-guo^{1,2}

(1. Department of Computer Science and Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;

2. Institute of Information Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100089, China)

Abstract: An adaptive watermarking technology for 2D electronic charts was proposed. It took count in the discrete wavelet domain scheme, and obtained an ideal embedding set for watermarks in the electronic chart space. In order to preserve topology of map effectively by the large embedding rates and protect the safety of watermarking scenario, a gray balance means was provided, and the maximum capacity in each divided rectangle blocks in the electronic charts was computed. The experiment also shows that it can adapt to data perturbation by conventional operations. The method has better robustness.

Key words: information hiding, digital watermarking, electronic chart, automatic adaptive

1 引言

二维电子海图是一种重要的数字海图,它除了具有高保真和高精度外,还具有数据耦合度低、图元类型丰富的特点。近年来,随着国家海洋战略的稳步实施,以及海洋开发、海军装备的快速发展,二维电子海图得到了大范围的应用。但二维电子海图应用过程中存在安全短板,特别是大范围应用后存在的安全问题,因此,它迅速被提到了国家数据安全战略高度。由于二维电子海图流通领域受限,制作及发布受到严格管理,所以

国内外针对二维电子海图的数字水印研究较少,《一种用于海图版权标识的小波域数字水印技术》^[1]是目前检索到为数不多的有关电子海图水印技术方面的文献。文献[2]论述了如何评价电子海图安全性以及如何用数字水印保护电子海图版权和内容,这是目前可查询的直接讨论电子海图数字水印的唯一文献。电子海图内容安全性的研究包括加密手段等^[3]。国外的相关研究主要有:基于结构性复合的安全水印,文献[4,5]先后提出了基于多级小波分解的复合安全水印策略,同时,二维电子海图属于一种矢量地图,很多适应性较

收稿日期:2015-04-10;修回日期:2015-07-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No.61202455);教育部博士点基金资助项目(No.20112304120025);黑龙江省自然科学基金重点基金资助项目(No.F201212);中央高校基础研究基金资助项目(No.HEUCF100612)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61202455), The Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (No.20112304120025), The Natural Science Foundation of Heilongjiang Province (No.F201212), The Fundamental Research Fund for the Central Universities (No.HEUCF100612)

好的矢量地图数字水印算法经过改进可以直接应用到该地图^[6-10]。

本文重点考虑电子海图不同于常规矢量地图的精度多样性。所谓精度多样性，即电子海图同时使用了海洋地理坐标系统和陆地的地理经纬度信息，海洋坐标系的精度约在 $10^{-7} \sim 10^{-9}$ ，而陆地坐标系精度可以达到 $10^{-13} \sim 10^{-15}$ ，因此，对于通过调整坐标值以嵌入数字水印的频域、空域算法来说，存在着诸多的不一致性，该类算法无法很好地并行处理 2 种精度的坐标系统，不是对精度损伤较大（迁就海洋坐标系），就是无法实现水印整体嵌入（只能嵌入陆地坐标系）。本文通过平移不变策略，将其转化为常规的二维电子地图，再通过自适应因子不断嵌入水印信息，并控制对地图的扰动幅度，以此获得可用性和安全性的平衡，较好地适应海图“图元类型复杂、数据耦合低”的特点。

2 平移不变策略求解特征节点

为了获得一个理想的水印载体集合，能够隐蔽且高可靠地嵌入足够容量的水印信息，首要问题是选择并优化可供水印嵌入的数据载体集合。相关学者对此提出了多种实现方案。

如图 1 所示，本质上地图是一幅图像，但具有较高的精度要求。由于色彩或信息的缺失会直接影响地理精度，同图像的简单表意不同，电子海图的图像图形信息还涉及到海洋和陆地的坐标系转换。

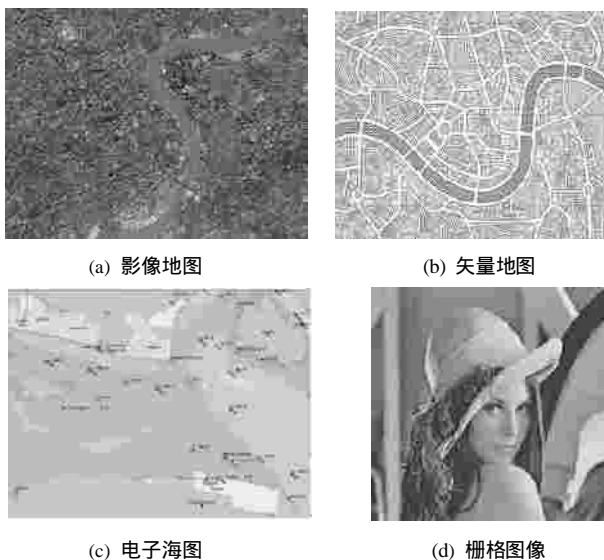


图 1 二维电子海图与其他数字地图及图像的对比

平移不变剪切策略主要用于图像融合，通过对 2 幅图像分别进行平移不变剪切变换分解，得到低频子带和一系列带通方向子带，并通过融合得到色彩更加鲜明的加强图像。

本文选取平移不变剪切策略提取特征点的出发点就是在于平移不变剪切变换得到的低频部分包含图像的主要能量。由于人类视觉系统对于图像边缘比较敏感，但对于独立亮度的节点往往忽略。平移不变剪切变换在获得高质量融合图像的过程中，恰恰能够得到这些独立的高能量节点，只需要通过对这些高能量节点低频子带的系数进行梯度域奇异值分解和局部结构描述子比较，从中获得相应的候选特征节点，这些节点是嵌入数字水印的理想位置。

梯度域奇异值分解算法流程如下。

- 1) 计算二维电子海图的梯度值 f 。
- 2) 利用网格划分的方法，将海图图像划分为等大的、数量不等的矩形块 $B\{b_1, b_2, b_3, \dots, b_i\}$ 。
- 3) 对每个矩形块 b_i ，将区域内的梯度值表示为矩阵 M_{ij} 。
- 4) 对 M_{ij} 进行奇异值分解，其中 M_{ij} 为一个 $n \times 2$ 的矩阵， n 为对应矩形块内像素的个数

$$M_{n \times 2} = \left[\left[\frac{\partial m_{i1}}{\partial x} \quad \frac{\partial m_{i1}}{\partial y} \right]^T, \left[\frac{\partial m_{i2}}{\partial x} \quad \frac{\partial m_{i2}}{\partial y} \right]^T, \dots, \left[\frac{\partial m_{in}}{\partial x} \quad \frac{\partial m_{in}}{\partial y} \right]^T \right]^T, L, \left[\frac{\partial m_{n2}}{\partial x} \quad \frac{\partial m_{n2}}{\partial y} \right]^T \quad (1)$$

5) 式 (1) 进一步表示为

$$M_{n \times 2} = \begin{bmatrix} a_{11} & L & a_{n1} \\ M & O & M \\ a_{1n} & L & a_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ M & M \\ b_{n1} & b_{n2} \end{bmatrix} Q^T = ACQ^T \quad (2)$$

其中，矩阵 A 和 Q 都是正交矩阵， C 为奇异矩阵。 Q 表示局部梯度的主要方向，由此可以计算局部梯度的结构描述子。

应用上述平移不变剪切策略求解水印编码嵌入顶点的前提是电子海图具有很好的纹理信息，奇异值矩阵 C 的特征值 l_1 、 l_2 可以直接反映出电子海图色彩的纹理变化。

如图 2(a) 所示，在海图的内陆及海洋深处区域，灰度变化较小，特别是右侧边缘几乎没有变化，此时，特征值 l_1 、 l_2 近似于 0；在海洋和陆地交接的区域，灰度变化大，此时特征值 $l_1 > l_2 \approx 0$ ；在海洋和陆地纵横交错区域，纹理信息丰富，此时特征值 $l_1 > l_2 > 0$ 。

为此，借助文献[11]所提方法，提出了电子海图图像像素能量的计算式，即

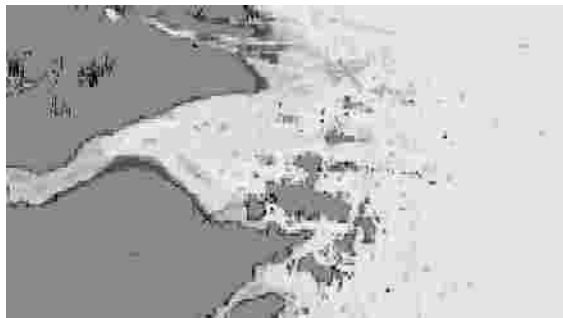
$$E(m_{ij}) = m_{ij}l_1 + m_{ij}l_2 \quad (3)$$

其中， $E(m_{ij})$ 为电子海图的局部结构描述子，描述任意像素节点的能量。能量大的节点具有丰富的纹理特征，且孤立，符合作为水印嵌入载体的要求。

图2(b)为提取的海图对应能量特征图，很好地反映了海图能量的分布，以及可能成为水印载体特征节点的情况。



(a) 原始海图



(b) 归一化海图

图2 海图预处理

3 灰度平衡方案

考虑到无限制地嵌入水印信息或调整特征点的像素值，会改变该特征点的能量，以致海图图像变化过于明显。因此，只有在一定范围内嵌入水印才不会破坏电子海图的灰度平衡性，如第2节所述，用海图的灰度平衡控制策略确保水印嵌入操作对地图内容扰动幅度在可控制范围内。灰度平衡方案如下。

通过能量计算得到的纹理节点或轮廓过渡性节点称为特征节点。设关键节点在平面内的位置为 (x, y) ，转化成极坐标形式为

$$I(x, y) \rightarrow I(r, q) \quad (4)$$

以水平方向为起点，按照矩形块长度或宽度进行分割，得到离散网格 (r, q_j) 。

海图的极坐标灰度分布为 $I(r, q)$ ，定义方向 q_j 的能量分布函数为

$$p(q_j) = \sum_{i=0}^{N-1} I(r_i, q_j), 0 \leq j < M \quad (5)$$

$p(q_j)$ 反映了海图图像在 q_j 方向的能量分布，以此类推，计算每个 q 的 $p(q)$ ，得到进一步的方向能量分布序列，过程如下。

1) 通过对电子海图进行小波变换奇异值分解，获得海图的纹理特征。

2) 通过电子海图的局部结构描述子获得所有像素节点的能量分布。

3) 以矩形块为单位，对海图进行极坐标转换，获得每个矩形块内的能量分布趋势。

4) 计算相应节点同所在区域平均能量的差值，获得对应各矩形块的差值序列。

5) 由于差值序列符合拉普拉斯近似分布，能够获得零点和峰值，用 OL 和 OR 表示左、右零点， HL 和 HR 表示2个对应的峰值。

6) 此时可得该电子海图能够接受的最大水印容量为 $f(TL) + f(TR)$ ，其中，函数 f 为频度。

7) 每一个节点 m_{ij} 占所在区域 b_j 平均能量的百分比为 $r(m_{ij})$ ，则 m_{ij} 可嵌入的水印最大长度为 $\lfloor r(m_{ij}) [f(TL) + f(TR)] \rfloor$ 。

4 数字水印算法

4.1 数字水印嵌入流程

输入：二位电子海图 V ，数字水印 W

输出：嵌入水印的海图 V'

1) 计算二维电子海图 V 的梯度值 f 。

2) 利用网格划分的方法，将海图图像划分为等大的量不等的矩形块 $B\{b_1, b_2, b_3, \dots, b_i\}$ 。

3) 对每个矩形块 b_i ，将区域内的梯度值表示为矩阵 M_{ij} 。

4) 对 M_{ij} 进行奇异值分解，得到计算局部梯度的结构描述子 $E(m_{ij})$ 。

5) 根据每个矩形块 b_i 中 $E(m_{ij})$ 的大小，按照降序排列所有矩形块。

6) 计算各矩形内相应节点同所在区域平均能量的差值，获得对应各矩形块的差值序列。

7) 计算得到每一个节点 m_{ij} ，以及其占所在区域

b_j 可嵌入的水印最大长度为 $\lfloor r(m_{ij})[f(TL)+f(TR)] \rfloor$ 。

8) 根据水印长度求得 W 嵌入所需的矩形块个数。

9) 顺序读取水印编码 W_i ，嵌入到对应节点的低频系数内。

10) 将嵌入节点位置编码为密钥 K 。

4.2 数字水印提取流程

数字水印的提取过程是嵌入操作的逆过程，鉴于海图纹理特征在不受攻击情况下的稳定性，提取流程如嵌入操作步骤 1)~步骤 7) 所述，获得水印嵌入的位置和每个矩形块内的容量。

在此基础上，根据密钥 K ，提取每个对应节点低频系数内的水印编码，并重新组织为水印 W_0 。

5 实验验证与分析

为了验证本文所述方法的正确性，系统选择 IMG 格式的影像地图进行测试，软件系统的开发环境为 VC6.0。

如图 3 所示，本文选择 2 幅电子海图用于本文算法测试。



(a) EA



(b) EB

图 3 IMG 格式电子海图

水印性能的定量评测指标为误码率。本文对提取到的水印信息编码 W_i ，若 W_i 与原始水印 W_0 完全一致的比特数占水印编码总长度的比值为 $1-p$ ，那么， W_i 与 W_0 的编码差异概率 p 被称为误码率。

水印标识采用统一的水印标记信息，如图 4 所示。



图 4 测试用数字水印

5.1 格式转换测试

格式转换是电子海图的常规操作之一，由于应用环境和目的不同，电子海图还有 TAB、TIFF、SHP、JPG 等多种格式，格式转换对色彩、纹理等图像特征都会有影响。

本节讨论目前广泛应用的数据存储类型。1) 在 TAB 格式的海图中嵌入水印后转换为 TIFF 格式；2) 在 TIFF 格式的海图中嵌入水印后转换为 SHP 格式。本文算法抗格式转换操作的误码率结果如表 1 所示。

表 1 本文算法抗格式转换操作的误码率

转换情况	误码率		海图
	文献[10]算法	应用自适应因子的本文算法	
TAB 转 TIFF	0.322	0.231	EA
	0.363	0.278	EB
TIFF 转 SHP	0.354	0.172	EA
	0.395	0.216	EB

由表 1 可知，格式转换操作对水印算法的影响很大，不可避免的噪声污染以及图像信号衰减，使很多节点的能量都有所变换。

本文应用自适应因子的优势体现在，无论海图能量如何衰减和变换，只要在合理范围内载有水印的节点，其能量始终符合所在区域的整体分布趋势，故较容易被检测。但是，如果攻击者运用特殊手段仅对地图的有限区域或极小区域进行噪声攻击，那么，该方法的误码率将会有所提升，这是由自适应因子的全局统计特性所决定的。

5.2 剪切攻击测试

抗攻击能力是衡量水印算法是否具有实用性的关键性指标。在各类攻击测试中，剪切操作是最频繁的一类，剪切同地图的拼接、旋转等相互关联，是海图数据遭遇侵权和图像非法复制的常见方式。本文算法抗剪切攻击的误码率结果如表 2 所示。

本文算法在自适应因子应用后尽管顽健性有所提升,但误码率仍然较高,原因在于水印随着地图被彻底剪切,唯一能够提升算法性能的趋势在于,如何有效检测剩余的水印信息。由于任何剪切后的地图,其能量分布和特征在局部范围内仍然保持较好,故自适应因子还能够起到一定作用。

表 2 本文算法抗剪切攻击的误码率结果/%

剪切方式	误码率	
	文献[10]算法	应用自适应因子的本文算法
中心 $\frac{1}{8}$	4.86	1.145
横向 $\frac{1}{4}$	5.03	1.701
纵向 $\frac{1}{4}$	2.79	4.593
中心 $\frac{1}{4}$	10.69	6.149
左上 $\frac{1}{4}$	8.13	10.620
右下 $\frac{1}{4}$	13.14	12.585
横向 $\frac{1}{2}$	18.96	18.390
纵向 $\frac{1}{2}$	19.37	17.102

5.3 噪声攻击测试

纹理和轮廓是地图的 2 类重要结构特征,也是海图核心的组成部分。噪声攻击是对频域扰动最为强烈的一类方法,本文选取了多种攻击方式来评测本文算法性能。

噪声攻击包括高斯噪声、随机噪声、椒盐噪声等独立攻击以及叠加攻击,表 3 为本文算法在各类噪声攻击下的误码率。

表 3 噪声攻击下本文算法的误码率/%

海图	应用自适应因子的本文算法			文献[10]算法		
	高斯	椒盐	随机	高斯	椒盐	随机
EA	11.64	12.59	12.06	14.98	15.67	15.42
EB	13.72	13.79	13.48	16.29	17.23	16.19

由于过度的噪声攻击会破坏海图的可用性,因此在一定阈值范围下的噪声攻击会导致海图像素值的重大变化,特别是海图通过格式转换后,以

JPG、SHP 等形式存在时,随着纹理和色彩特征的改变,水印信息受到的干扰较大。

同样,自适应因子是基于全局和区域性的能量分布统计,并以此控制水印信息嵌入的强度,因而,当整体范围内受到噪声攻击时,水印信息还能具有一定的抗攻击性。

5.4 水印容量分析与测试

水印容量、不可见性和顽健性是水印综合性能的 3 大评测指标,相互制约并彼此影响。适合的水印容量能够确保足够的水印信息有规则地嵌入到载体中,从而为载体提供内容保护。

本文对水印算法进行水印容量测试。设定测试时的误码率阈值分别为 5% 和 10%,测试得到的水印最大容量如表 4 所示。

表 4 算法的水印容量测试对比

海图	容量/bit		
	文献[10]算法	应用自适应因子的本文算法	差值
EA (5%)	5 830	8 492	2 662
EB (5%)	3 603	5 291	1 688
EA (10%)	6 282	9 516	3 234
EB (10%)	4 021	6 833	2 812

从表 4 可知,启用自适应因子误码率较低情况下,水印容量差值变小,如果仅仅通过节点搜索而无指导性地嵌入水印,那么部分水印容量的提升会直接导致误码率提高。

为此,参照视觉检测的常见手段,本文对嵌入水印信息的电子海图进行视觉检测,将其分为 2 组。A 组被告知地图内包含水印,并提供原始地图,要求在尽可能短的时间内找出差异或水印嵌入位置;B 组被告知数字水印嵌入方式,要求找到水印嵌入位置。测试时间限定 10 min,每 1 min 统计一次。由图 5 实验结果可以看到,A 组仅 1 人检测到水印位置;B 组有 2 人检测到数字水印嵌入位置,但无法完整提取水印。

6 结束语

由于电子海图具有丰富的纹理特性和矢量结构,本文所提出的平移不变策略和灰度平衡方案都非常适合电子海图水印算法的实施。分析表明,该方法具有很好的顽健性,携带水印的节点能量突出,孤立存在,不易引起视觉系统检测。在引入

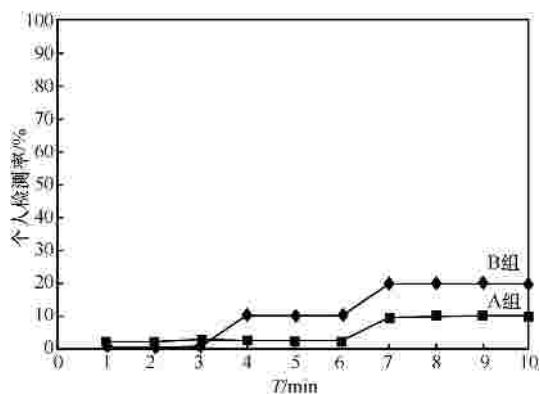


图 5 视觉检测结果

自适应因子后，算法很好地控制了每个节点的水印嵌入容量。如何应对不同纹理特征的电子海图，是水印算法性能进一步提升的关键。

参考文献：

[1] 凌勇, 陈高兴, 田震. 一种用于海图版权标识的小波域数字水印技术[J]. 中国海事, 2006, 9: 23-26.
LING Y, CHEN G X, TIAN Z. A digital printing technology for copyright identification of sea charts[J]. China Maritime, 2006, 9: 23-26.

[2] LAI M Z, ZHANG G Y. A novel vector map watermarking evaluation based on electronic chart[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014: 622-627.

[3] ZHAO Y X, LI G, LI L. Electronic chart encryption method based on chaotic stream cipher[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2007, 28(1): 60-64.

[4] GERRIT S, VOIGT M. A high capacity watermarking system for digital maps[C]//The 2004 Multimedia and Security Workshop on Multimedia and Security. Germany, Magdeburg. c2004: 180-186.

[5] SUK-HWAN L, KI-RYONG K. Vector watermarking scheme for GIS vector map management[J]. Multimedia Tools and Application, 2011: 1-34.

[6] Bi N, SUN Q Y, HUANG D R, et al. Robust image watermarking based on multiband wavelets and empirical mode decomposition[J]. IEEE Transaction on Image Process. 2009, 16(8): 195-1966.

[7] SUN J G, MEN C G. Wavelet neural network based watermarking technology of 2D vector maps[J]. High Technology Letters, 2011,

17(3): 259-262.

[8] DAVYDOV A, KOVALEV A, LZYUROV K. Distortion measure of watermarking 2D vector maps in the mesh-spectral domain[C]//17th DSP 2011 International Conference on Digital Signal Processing. Corfu, Greece, c2011: 1123-1129.

[9] JUNQYEOP K. Vector map digital watermarking using angles[C]//6th International Conference on Networked Computing and Ad Information Management. c2010: 417-423.

[10] ZHANG H S, LI Y. Towards a 2D vector map with a feature nodes based watermarking method[C]//Geoinformatics 2008 and Joint Conference on GIS and Built Environment: Advanced Spatial Data Models and Analyses, c2008: 7146, 1-10.

[11] XU G Y, TAN J Q, ZHONG J Q. Adaptive efficient non-local image filtering [J]. Journal of Image and Graphics, 2012, 17(4): 471-479.

作者简介：



徐锋 (1977-), 男, 北京人, 哈尔滨工程大学博士生, 主要研究方向为信息安全。



李佳楠 (1994-), 女, 黑龙江巴彦人, 主要研究方向为网络信息安全、下一代网络体系结构。



孙建国 (1981-), 男, 黑龙江巴彦人, 哈尔滨工程大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为信息安全、嵌入式系统设计。