

# 基于 DFT 的可控误差矢量空间数据盲水印算法

张黎明<sup>1,2</sup> 闫浩文<sup>1,2</sup> 齐建勋<sup>3</sup> 张永忠<sup>3</sup>

1 兰州交通大学测绘与地理信息学院,甘肃 兰州,730070

2 甘肃省地理国情监测工程实验室,甘肃 兰州,730070

3 兰州市勘察测绘研究院,甘肃 兰州,730000

**摘要:**传统的 DFT(discrete Fourier transform)变换域水印算法中,水印直接嵌入变换后的系数,导致矢量空间数据误差较大。针对此类算法的缺点,本文提出了基于 DFT 的可控误差矢量空间数据盲水印算法。该算法通过放大处理 DFT 变换系数,将水印嵌入幅度系数和相位系数中,水印提取采用投票原则,无需原始数据的参与。试验表明,水印嵌入矢量空间数据引起的误差很小;水印对数据格式转换及常见的几何变换攻击具有很好的鲁棒性。

**关键词:**DFT;可控误差;矢量空间数据;盲水印

**中图法分类号:**P208;P391

**文献标志码:**A

地理信息系统(GIS)与计算机网络技术的飞速发展,一方面为各种数字化地图产品的存取、拷贝和传播提供了极大的方便;但另一方面,使得盗版变得极其容易<sup>[1]</sup>。因此,如何进行空间数据的版权保护,引起了地学界的高度重视。目前,常用数字水印技术来保护数字地图版权<sup>[2]</sup>。

数字水印具有两个重要特征:不可见性与鲁棒性<sup>[1]</sup>。不可见性要求水印嵌入空间数据后引起的误差要尽可能小,由此导致的空间位置误差不易为用户感知;鲁棒性是指带水印的空间数据在几何变换、数据编辑、数据格式转换等操作中水印信息能够保持完整。一般来说,变换域算法比空间域算法鲁棒性高,这也是目前水印算法研究的主要方向<sup>[3]</sup>。本文将提出一个基于离散傅里叶变换(discrete Fourier transform, DFT)的盲水印算法。

## 1 DFT 变换域水印算法的原理

矢量空间数据在使用中通常会进行几何变换,而 DFT 对几何图形平移、旋转、缩放等具有不变性特点,所以基于 DFT 的水印算法在抗几何攻击上具有天然的优势<sup>[9]</sup>。文献[4-13]都是基于 DFT 的数字水印算法,这类算法的原理是:选择

图形的坐标点  $v_k$ , 得到顶点序列  $\{v_k\}$  ( $v_k = (x_k, y_k)$ )。根据表达式(1),将  $x_k$  和  $y_k$  组合起来表示成一个复数序列  $\{a_k\}$ :

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

式中,  $N$  为图形顶点数目。

对  $\{a_k\}$  做 DFT 变换,根据式(2)得到离散傅里叶系数  $\{A_l\}$ :

$$A_l = \sum_{k=0}^{N-1} a_k (e^{-i2\pi/N})^{kl}, l \in [0, N-1] \quad (2)$$

$\{A_l\}$  包含了幅度系数  $\{|A_l|\}$  和相位系数  $\{\angle A_l\}$ 。通过使用不同的水印嵌入方法,水印可以嵌入到 DFT 变换后的幅度系数上,也可以嵌入到相位系数中。但是,水印直接嵌入变换后的系数中,会对原始数据产生较大影响,特别是相位系数的较小改变可能导致原始数据的较大改变。

文献[9]通过加法法则把水印信息嵌入 DFT 变换后的相位系数,对提取出的水印信息与原始水印信息进行对比,根据自相关检测系数判定是否含有水印信息。实验选择嵌入强度  $P=0.02 \sim 0.03$ , 嵌入水印后,最大误差达到两个单位的坐标点有 1 883 个。

文献[10]通过量化方法把水印信息嵌入变换后的幅度系数中。实验选取的量化步长是 50、100、200。量化步长为 50 时,最大误差达到两个

收稿日期:2013-11-15

项目来源:国家自然科学基金资助项目(41371435, 41404050);国家科技支撑计划资助项目(2013BAB05B01);甘肃省科技支撑计划资助项目(1304GKCA009);甘肃省自然科学基金资助项目(148RJZA041);甘肃省财政厅基本科研业务费资助项目(214146)。

第一作者:张黎明,博士生,副教授,主要从事空间数据安全,版权保护,数字水印的理论与方法研究。E-mail:zhang\_lm@163.com

单位,随着量化步长的增大,最大误差甚至超过了 3 个单位。这是因为该算法将水印直接嵌入 DFT 变换后的幅度系数中,对原始数据产生了较大影响,引起了较大的误差。此外,DFT 变换后,幅度系数与原始数据的数值大小有关,幅度系数越小,直接量化嵌入幅度系数引起的坐标误差越大。

本文利用 DFT 变换的自身特点,设计了一种可控误差的矢量空间数据盲水印算法。该算法既能保证变换域水印的鲁棒性,又使得水印嵌入引起原始数据的误差较小,且实现盲检测。

## 2 水印嵌入与提取算法

在 DFT 水印算法中,水印信息既可嵌入变换后的幅度系数,也可以嵌入变换后的相位系数。DFT 变换后,幅度系数具有平移和旋转不变性,相位系数具有平移和缩放不变性。因此,在幅度系数中嵌入水印,可以抵抗几何变换中的平移和旋转操作对水印的影响;在相位系数中嵌入水印,可以抵抗几何变换中的平移和缩放操作对水印的影响。为了能在几何变换操作中保证水印不受影响,本算法将水印独立嵌入幅度系数和相位系数中,可以同时从幅度系数和相位系数中提取水印。

由于 DFT 本身就是一种浮点运算,不管是浮点型的矢量空间数据还是整数型的矢量空间数据,通过 DFT 变换后,幅度系数和相位系数都会以浮点数表示。DFT 变换中,浮点数采用 Double 类型的数据,Double 类型的数据有效位数为 15~16 位。为了满足不同矢量空间数据水印嵌入的需要,水印信息应合理嵌入到变换后系数的有效数据位部分。权衡水印的鲁棒性和数据的精度要求,一般选择 Double 类型的数据小数位的 8~10 位嵌入水印。

为了实现盲水印,本算法采用区间量化方法嵌入水印。具体实现步骤是,对变换后的系数,放大  $10^n$  倍。根据 DFT 变换系数的大小并顾及数据的精度要求,自适应计算出  $n$  的大小,从而控制了水印嵌入引起的误差范围。水印信息通过调整系数的量化区间,嵌入到放大后的幅度系数和相位系数中。由于系数是以浮点数存储,系数的放大只是改变了指数值的大小,对底数(有效数据)不会有影响,因此不会产生截断误差。同样,系数缩小后也不会产生误差。

由于傅里叶变换是一种全局变换,局部很小的修改就可以引起全部傅里叶系数的变化,导致水印算法对于局部修改没有鲁棒性<sup>[14]</sup>。为了克

服小范围的修改不至于引起全部傅里叶系数的变化,本算法把二维矢量地图基本图形对象作为一个独立的嵌入单位,个别图形对象的删除、修改操作不会影响其他图形对象中嵌入的水印信息。

为了能完整地提取水印,矢量地理空间数据的坐标点数应不少于水印的比特数。当坐标点数较多时,水印可能被多次嵌入;提取水印时,采用投票原则,以使提取到的水印更加可靠。

### 2.1 水印嵌入算法

水印的生成与嵌入具体过程如下:

1) 水印的生成:读取原始二值水印图像,应用 Logistic 混沌变换<sup>[15]</sup>来置乱水印图像;然后变换置乱后的水印图像为一维序列  $\{\omega_i=0,1|i=0,1,\dots,M-1\}$ ,  $M$  为水印长度。

2) 读取矢量地理空间数据,以几何对象(线对象或面对象)为单位进行水印信息的嵌入。读取几何对象的所有顶点坐标,根据式(1)产生复数序列  $\{a_k\}$ 。

3) 对  $\{a_k\}$  进行 DFT 变换,由式(2)得到变换后的 DFT 系数  $\{a_l\}$ 。该序列包括幅度系数  $\{|A_l| \}$  和相位系数  $\{\angle A_l\}$ 。

4) 对  $\{|A_l| \}$  和  $\{\angle A_l\}$  分别放大  $10^n$  倍。

幅度系数放大的倍数需要考虑幅度的数量级。假定量化值  $R=20$ 。如果直接嵌入幅度系数,水印嵌入引起的最大误差为  $R/2$ ;而通过放大系数  $10^n$  后,嵌入水印引起的误差就是原来的  $1/10^n$ 。 $n$  的计算方法如下:假如要求水印嵌入到幅度系数的第 9~10 有效数据位,可以通过  $n=9-\lg(|A_l|)$  来计算  $n$  的大小。而相位系数一般介于  $-\pi\sim\pi$ ,  $n$  取 7~11 为宜。幅度系数和相位系数放大的倍数  $n$  不一定相同。

根据量化嵌入法则,将放大后的幅度系数  $\{|A_l| \}$  和相位系数  $\{\angle A_l\}$  嵌入水印数据。通过式(3)计算得出嵌入水印后的系数  $A'_l$ :

$$A'_l = \begin{cases} A_l - R/2, & \omega(i) = 0, \text{Mod}(A_l, R) > R/2 \\ A_l, & \omega(i) = 0, \text{Mod}(A_l, R) \leq R/2 \\ A_l + R/2, & \omega(i) = 1, \text{Mod}(A_l, R) \leq R/2 \\ A_l, & \omega(i) = 1, \text{Mod}(A_l, R) > R/2 \end{cases} \quad (3)$$

其中,  $R$  为量化值。

根据嵌入的水印是“0”还是“1”,将量化区间调整到所在区间或保持不变。如嵌入水印为“0”,原来量化值大于  $R/2$ ,则需调整量化区间到  $[0, R/2]$ ,具体计算方法为系数值减去  $R/2$ 。

6) 将嵌入水印后的傅里叶系数再缩小到原

来的大小。

7) 对  $\{A'_i\}$  进行离散傅里叶逆变换, 得到嵌入水印后的复数序列  $\{a'_k\}$ 。

根据  $\{a'_k\}$  修改顶点坐标, 得到嵌入水印后的矢量数据。

## 2.2 水印提取算法

水印提取是水印嵌入的逆过程。具体如下:

1) 读取待测数据, 根据式(1)产生复数序列  $\{a'_k\}$ 。

2) 对  $\{a'_k\}$  进行 DFT 变换, 得到离散傅里叶系数  $\{A'_i\}$ 。

3) 对  $\{A'_i\}$  幅度系数和相位系数分别放大  $10^n$  倍。

采用嵌入水印时的量化值  $R$ , 计算出系数所在的量化区间, 各自提取出幅度系数水印和相位系数水印。

对提取到的两个一维水印序列, 进行升维处理并反置乱, 得到最终水印图像。

由于每一个水印位  $\{w_i\}$  可能被多次嵌入, 因此采用投票原则来确定水印信息。计算方法是: 定义一个与水印序列等长的整数序列  $\{B(i)=0, i=0, 1, \dots, M-1\}$ ,  $M$  为水印长度。单个水印位  $b'(i)$  通过式(4)量化提取计算:

$$b'(i) = \begin{cases} -1, \text{Mod}(A_i, R) \leq R/2 \\ 1, \text{Mod}(A_i, R) > R/2 \end{cases} \quad (4)$$

相同水印位提取过程中, 使用公式  $B(i) = B(i) + b'(i)$  来统计出水印信息值  $-1$  和  $1$  的多数, 如“1”为多数, 则  $B(i) > 0$ ; 然后根据式(5)来重构出二值水印图像:

$$w'(i) = \begin{cases} 1, B(i) > 0 \\ 0, B(i) \leq 0 \end{cases} \quad (5)$$

## 3 试验与分析

为了检验算法在不同矢量空间数据下的普适性, 本文用一幅 1:5 000 境界线地图和一幅 1:400 万的全国地形图进行试验。数据格式为 ArcGIS 的 shp 格式。前者要素层数据量约为 349 KB, 共有 20 292 个坐标点; 后者要素层数据量约为 1.33 MB, 共有 80 965 个坐标点。实验中, 水印嵌入到点坐标数值有效位的 9~10 位。对两组数据嵌入水印后的误差进行了统计, 并从嵌入水印后数据的可用性、不可见性、鲁棒性及误差控制等几个方面进行了分析。实验中用的水印是 64 像素  $\times$  64 像素的二值水印图像, 如图 1 所示。

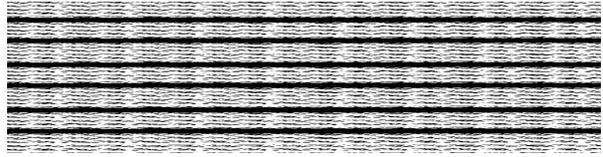


图 1 原始水印

Fig. 1 Original Watermark

### 3.1 可用性

本文采用绝对误差和最大误差来统计评价数据精度, 结果如表 1 所示。

表 1 不同  $R$  下数据绝对误差直方图及最大误差  
Tab. 1 Absolute Errors of Coordinates and Maximum Error Under Different Values of  $R$

$R$	4	20	50	100
1:5000				
最大误差	0.000 336	0.001 8	0.004 6	0.010 2
1:400万				
最大误差	$1.0 \times 10^{-6}$	$4.0 \times 10^{-6}$	$8.0 \times 10^{-6}$	$1.9 \times 10^{-5}$

从表 1 可以看出, 嵌入水印所引起的坐标数据绝对误差均很小。随着量化值  $R$  的增加, 误差逐步增加, 最大误差也逐渐增加。因此, 从绝对误差的分布及最大误差数值可以看出, 该算法对数据精度影响较小。

### 3.2 不可见性

试验中, 取量化步长  $R$  分别为 4、20、50、100, 在 1:5 000 和 1:400 万两组不同比例尺数据下, 嵌入水印前后局部放大效果如图 2 所示。虽然嵌入水印前后图形分别用不同颜色表示, 但是, 从

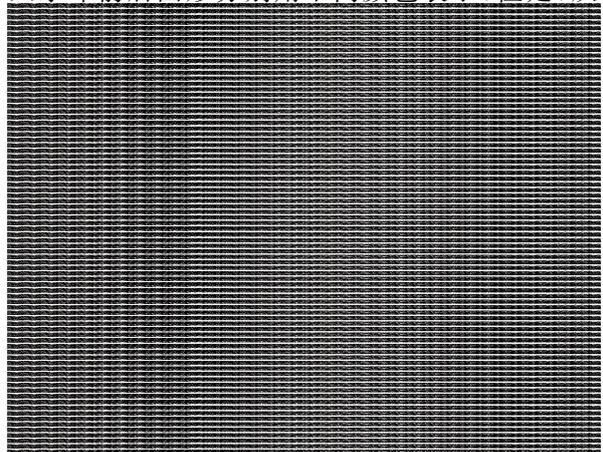


图 2 嵌入水印前后比较

Fig. 2 Comparison of Original Data and Watermarked Data

图 2 可以看出,嵌入水印前后图形几乎完全重合。此外,从数据绝对误差分析可以看出,嵌入水印后,最大误差远远小于 1 个单位。用合理的系数放大后,水印会嵌入有效数据的中部。在这个范围内,量化步长对水印的可见性几乎没有影响。

### 3.3 鲁棒性

量化值  $R$  取 20。通过对 1 : 5 000 含水印数据在无攻击、数据格式转换、平移、缩放、删除图形对象等情形下进行仿真实验,均能够很好地提取水印图像(表 2)。对 1 : 400 万数据也进行同样的攻击试验,效果良好。在数据格式转换时,将嵌入水印的数据转换为 MapInfo 格式数据,再逆转回原格式数据,同样能够很好地提取水印信息。

表 2 算法的鲁棒性

Tab.2 Robustness of the Algorithm

无攻击	格式转换	平移 5 单位	旋转 10°	放大 2 倍	缩小 0.5 倍	50%图形

### 3.4 误差控制

以 1 : 5 000 数据为例,取  $R=20$ ,相位系数放大倍数为  $10^{10}$  保持不变情况下,分别以不同的放大倍数(表 3)进行试验。从表 3 可以看出,在合理的放大倍数下,均可以很好地提取到水印信息,并且能够控制最大误差。

表 3 放大倍数与最大误差

Tab.3 Magnifications and Maximum Error

放大系数	$10^3$	$10^6$	$10^9$
提取水印			
最大误差	0.007 9	7.000 0	7.000 0

## 4 结 语

本文针对 DFT 变换的特点,提出了基于 DFT 的可控误差矢量空间数据盲水印算法。算法简单,易于实现,可适用于不同比例尺矢量数据水印嵌入。但是由于不同比例尺数据所允许的误差不同,所以在确保数据精度的同时,为了提高水印的鲁棒性,尽可能将水印嵌入到较高的有效数据位部分。通过仿真试验,可以看出算法具有很好的可用性、不可见性,同时对几何变换具有很好的鲁棒性,是矢量空间数据版权保护的一种实用方法,该方法已应用于大比例尺空间数据水印系统中,使用效果良好。

试验中,在 50%的图形对象中仍然能够提取水印。这是因为在水印嵌入时,以图形对象为单位分别独立、多次嵌入,因此,删除部分图形对象后,从剩余图形对象中仍然能够提取到水印。

如果对图形对象内部随机删点后,则几乎无法提取到水印。这是由于 DFT 变换的局部性,使得增加、删除点后,傅里叶变换系数会发生很大的变化,水印遭到破坏。

此外, $R$  取 4、10、20、50、100、200,作了如表 2 同样的试验,效果同样较好。当  $R < 4$  或  $R > 200$  时,在无攻击的情形下,提取到的水印效果不好;如果  $R$  太小,量化提取区间不明显; $R$  较大,系数修改较大,提取时水印效果较差。

### 参 考 文 献

- [1] Yan Haowen, Li Jun, Wen Hong. A Key Points-Based Blind Watermarking Approach for Vector Geo-Spatial Data[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2011, 35(6):485-492
- [2] Niu Xiamu, Shao Chengyong, Wang Xiaotong. A Survey of Digital Vector Map Watermarking[J]. *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, 2006, 2(6): 1 301-1 316
- [3] Kang H I I, Kim K I I, Choi J U K. A Vector Watermarking Using the Generalized Square Mask[C]. *Information Technology: Coding and Computing, Proceedings of International Conference on IEEE*, San Jose, California, USA, 2001
- [4] Lee S H , Kwon K R. Vector Watermarking Scheme for GIS Vector Map Management[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2013, doi: 10. 1007/s11042-011-0894-y
- [5] Solachidis V, Nikolaidis N, Pitas I. Fourier Descriptors Watermarking of Vector Graphics Images [C]. *Proceedings of 2000 International Conference on IEEE (Image Processing)*, Vancouver B C, Canada, 2000
- [6] Solachidis V, Pitas I. Watermarking Polygonal Lines Using Fourier Descriptors [J]. *Computer Graphics and Applications, IEEE*, 2004, 24(3): 44-51
- [7] Giannoula A, Nikolaidis N, Pitas I. Watermarking of Sets of Polygonal Lines Using Fusion Techniques

- [C]. Multimedia and Expo, ICME'02, Lausanne, Switzerland, 2002
- [8] Kitamura I, Kanai S, Kishinami T. Copyright Protection of Vector Map Using Digital Watermarking Method Based on Discrete Fourier Transform[C]. Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS'01, Sydney, 2001
- [9] Wang Qisheng, Zhu Changqing, Xu Dehe. Watermarking Algorithm for Vector Geo-spatial Data Based on DFT Phase[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(5): 523-526(王奇胜,朱长青,许德合.利用DFT相位的矢量地理空间数据水印方法[J].武汉大学学报·信息科学版,2011,36(5):523-526)
- [10] Xu Dehe, Zhu Changqing, Wang Qisheng. Blind Watermarking Model of Vector Spatial Data Based on DFT of QIM[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35(9): 100-103(许德合,朱长青,王奇胜.利用QIM的DFT矢量空间数据盲水印模型[J].武汉大学学报·信息科学版,2010,35(9):100-103)
- [11] WANG Qisheng. Research on Digital Watermarking for Vector Geo-spatial Data Based on DFT [D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2008 (王奇胜.基于DFT的矢量地理空间数据数字水印技术研究[D].郑州:信息工程大学,2008)
- [12] Xu Dehe. Research on the Model of the Digital Watermarking for Vector Geo-spatial Data Based on DFT [D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2008 (许德合.基于DFT的矢量地理空间数据数字水印模型研究[D].郑州:信息工程大学,2008)
- [13] Zhao Lin. Research on Adaptive Vector Map Watermarking Algorithm Based on DFT[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2009 (赵林.基于DFT自适应矢量地图水印算法的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2009)
- [14] Min Lianquan. A Survey of Watermarking Techniques for Vector Map Data[J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2009(2): 96-102 (闵连权.矢量地图数据的水印技术综述[J].测绘科学技术学报,2009(2):96-102)
- [15] Pareek N K, Patidar V, Sud K K. Image Encryption Using Chaotic Logistic Map[J]. *Image and Vision Computing*, 2006,24(9): 926-934

## A Blind Watermarking Algorithm for Copyright Protection of Vector Geospatial Data Under Controllable Errors Based on DFT

ZHANG Liming<sup>1,2</sup> YAN Haowen<sup>1,2</sup> QI Jianxun<sup>3</sup> ZHANG Yongzhong<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Geomatics, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China

<sup>2</sup> Gansu Provincial Engineering Laboratory for National Geographic State Monitoring, Lanzhou 730070, China

<sup>3</sup> Lanzhou City Survey Mapping Institute, Lanzhou 750050, China

**Abstract:** In DFT watermarking algorithms, the watermarks are often embedded directly in the transformation coefficients, causing large errors in watermarked data. To overcome such disadvantage of these algorithms, a blind watermarking algorithm for copyright protection of vector geospatial data based on error reduction is proposed. This algorithm amplifies the DFT transform coefficients and embeds the watermarks in the amplitude coefficients and phase coefficients by DFT transform, and the watermark is embedded several times. In addition, the voting principle is utilized to detect the watermark. No original data is needed in the watermark extraction procedure. The experiments have shown that spatial accuracy of the watermarked data is acceptable and the algorithm is robust to a variety of geometric transformation attacks.

**Key words:** DFT; controllable errors; vector geospatial data; blind watermarking

**First author:** ZHANG Liming, PhD candidate, associate professor, specializes in the theories and methods of spatial data security and digital watermarking. E-mail: zhang\_lm@163.com.

**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41371435, 41404050; the Key Projects in the National Science & Technology Pillar Program During the Twelfth Five-Year Plan Period, No. 2013BAB05B01; the Key Project of the Research Program of Gansu Province, No. 1304GKCA009; the Natural Science Foundation of Gansu Province, No. 148RJZA041; the Fundamental Research of Gansu Provincial Finance Department, No. 214146.